Satelliten-synoptische Jet-Streak-Phänomene und ihre Einbeziehung in die Wettervorhersage

Von VERONIKA ZWATZ-MEISE

(Vorgelegt in der Sitzung der math.-nat. Klasse am 11. April 1991 durch das k. M. PETER STEINHAUSER)

Zusammenfassung

Satelliten-synoptische Jet-Streak-Phänomene und ihre Einbeziehung in die Wettervorhersage

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, alle Bewölkungsphänomene zu erfassen, die im Zusammenhang mit Jet-Streams und Jet-Streaks auftreten und in Satellitenbildern beobachtet werden können sowie konzeptionelle Modelle für den dabei herrschenden physikalischen Zustand zu formulieren. Dazu wurden alle Jet-Streak-Episoden, die innerhalb eines Jahres über dem europäischen Kontinent auftraten, bearbeitet. Das dafür verwendete Material umfaßt neben Satellitenbildern Feldverteilungen verschiedenster relevanter Parameter auf isobaren und isentropen Flächen sowie vertikale Querschnitte.

Es konnten folgende satelliten-synoptische Jet-Streak-Kategorien abgeleitet werden:

1. EC/Komma in der linken „exit region“ von Jet-Streaks;
2. Modifikationen der Frontbewölkung wie: Verstärkung in der linken „exit region“, Auflösung in der rechten „exit region“ und Verstärkung in höheren Schichten auf der antizyklonalen Seite;
3. Jet-Streak-Wellen;
4. Fasern an der Jet-Achse und diverse Abweichungen von dieser Lage.

In der Arbeit wird für jede Kategorie zunächst ein aus den Ergebnissen aller Fälle abgeleitetes konzeptionelles Modell beschrieben, welches sodann ausführlich durch eine oder mehrere Fallstudien illustriert wird.

Ferner wird für die besonders wetteraktiven Jet-Streak-Kategorien eine Untersuchung über die Niederschläge, die im zwölfstündigen Verlagerungsbereich der Jet-Streaks auftreten, durchgeführt und werden die Ergebnisse mit den vom numerischen Modell (EZMW) vorhergesagten Niederschlagsmengen verglichen.

Sowohl die konzeptionellen Modelle als auch die Ergebnisse der Niederschlagsuntersuchungen werden auf ihre prognostische Anwendbarkeit hin getestet.

Summary

Satellite-synoptic jet-streak-phenomena and their usefulness for weather forecast

In this paper an attempt is made to catch all cloud configurations in connection with jet-streams and jet-streaks which can be observed in satellite images and to formulate conceptual models of the physical state of the atmosphere which causes the cloudiness. For this aim all jet-streak-episodes which happened within one year over the European continent where investigated. The material used contains satellite images as well as fields of several parameters on isobaric and isentropic surfaces and vertical cross sections.

The following satellite-synoptic jet-streak-categories could be derived:

1. EC/comma in the left exit region of jet-streaks;
2. modifications of frontal cloudiness like: intensification in the left exit region, dissolution in the right exit region and development of cloudiness in higher levels on the anticyclonic side;
3. jet streak waves;
4. cloud fibres at the jet-axis and several deviations from this position.

In this paper for every category first of all a conceptual model is described which has been derived from the results of all cases studied; then it is illustrated by at least one detailed case study.

Furtheron for the weather active jet-streak-categories an investigation about precipitation occuring in the 12-hourly propagation area of the jet-streaks is made. The results are compared with the precipitation amounts forecasted by numerical models (ECMWF).

The conceptual models as well as the results of the precipitation investigation are tested in regard to their prognostic applicability.

Inhaltsverzeichnis

Tafeln 1, 2
Tafel 3

1. Einleitung und Problemstellung

2. Grundlegende Modelle und typische Bewölkungskonfigurationen in Zusammenhang mit Jet-Streaks
   2.1. Ein konzeptionelles Jet-Streak-Modell
   2.2. Kleinräumige Rotationen unmittelbar unter der Jet-Achse
   2.3. Kaltfrontmodelle: Das „converyor belt"-Modell
   2.4. Typische Wolkenkonfigurationen in Satellitenbildern
      2.4.1. Typische Jet-Stream-Bewölkung
      2.4.2. Die Bewölkungskonfigurationen „EC" und „Komma"
      2.4.3. Typische Kaltfrontbewölkung und Wellen

3. SATMOD – die verwendete Methodik

4. Entwicklung konzeptioneller Modelle für satelliten-synoptische Jet-Streak-Kategorien
   4.1. EC oder Komma in der linken „exit region"
   4.2. Modifikation von Fronten
      4.2.1. Frontverstärkung in der linken „exit region"
      4.2.2. Auflösung der Frontbewölkung auf der antizyklonalen Seite
      4.2.3. Frontverstärkung auf der antizyklonalen Seite
   4.3. „Jet-Streak-Welle"
   4.4. „Fasern an der Achse"
   4.5. Zusammenfassende Bemerkungen

5. Statistische Untersuchungen der satelliten-synoptischen Jet-Streak-Kategorien

6. Prognostische Anwendungen
   6.1. Diagnostische und prognostische Aussagen über Niederschlagsmengen
   6.2. Erfassung von Jet-Streak-Situationen mittels operationellem Material

7. Zusammenfassende Bemerkungen

Danksagung
Literatur

Tafel 1
Verwendete Symbole

∇	zweidimensionaler Nabla-Operator
$\vec{v}$	zweidimensionaler Windvektor
V	Betrag des zweidimensionalen Windvektors
s	Stromliniensegment
ζ_a	absolute Vorticity
T	Temperatur
∇T	Temperaturgradient
Θ	potentielle Temperatur
Θ_e	äquivalent-potentielle Temperatur
Θ_{ek}	modifizierte äquivalent-potentielle Temperatur
p	Luftdruck
R	individuelle Gaskonstante
c_p	spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck
r	Kondensationswärme
q_m	Mischungsverhältnis
T_k	Temperatur des Kondensationsniveaus

Tafel 2
Häufig gebrauchte Abkürzungen

PVA	positive Vorticityadvektion
NVA	negative Vorticityadvektion
TA	Temperaturadvektion
WLA	Warmluftadvektion
KLA	Kaltluftadvektion
TFP	thermischer Frontparameter
EC	Enhanced Cumuli
SATMOD	Satellite Images and Model Output Diagnosis
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage in Reading

Tafel 3
In den Abbildungen verwendete Parameterfelder aus EZMW-Daten

Parameter	Abkürzung in der Abbildung	Wert der verstärkten Isolinie	Isolinien-abstand	Dimension Magnitude
abs. Top. 1000 hPa	H1000	0	4	10^1 gpm
abs. Top. 500 hPa	H500	552	8	10^1 gpm
abs. Top. 300 hPa	H300	912	8	10^1 gpm
rel. Top. 500/1000 hPa	RT5/1	552	4	10^1 gpm
Temperatur-advektion 500/1000 hPa	TA5/1	0	2	10^0 Grad/ 12 Stdn
rel. Vorticity 500 hPa	V500	0	2	10^{-5} sec^{-1}
rel. Vorticity 300 hPa	V300	0	2	10^{-5} sec^{-1}
abs. Vorticity-advektion 500 hPa	VA500	0	1	$10^{-9}sec^{-2}$
abs. Vorticity-advektion 300 hPa	VA300	0	1	$10^{-9}sec^{-2}$
Krümmungs-vorticity 500 hPa	VK500	0	2	$10^{-5}sec^{-1}$

Parameter	Abkürzung in der Abbildung	Wert der verstärkten Isolinie	Isolinien-abstand	Dimension Magnitude
Krümmungs-vorticity 300 hPa	VK300	0	2	10^{-5}sec^{-1}
Scherungs-vorticity 500 hPa	VS500	0	2	10^{-5}sec^{-1}
Scherungs-vorticity 300 hPa	VS300	0	2	10^{-5}sec^{-1}
Omega 850 hPa	0850	0	5	10^{0} hPa/Std
Omega 700 hPa	0700	0	5	10^{0} hPa/Std
Omega 500 hPa	0500	0	5	10^{0} hPa/Std
Isotachen 500 hPa	I500	25	10	10^{0}m/sec
Isotachen 300 hPa	I300	25	10	10^{0}m/sec
rel. Feuchte 700 hPa	RF700	80	15	%
rel. Feuchte 500 hPa	RF500	80	15	%
abs. Wind-vektoren 300 hPa	WABS300			
abs. Wind-vektoren 500 hPa	WABS500			
rel. Wind-vektoren 300 hPa	WREL 300			
rel. Wind-vektoren 500 hPa	WREL500			
ageostro-phische Windvektoren 1000 hPa	VAG1000			

Parameter	Abkürzung in der Abbildung	Wert der verstärkten Isolinie	Isolinien-abstand	Dimension Magnitude
ageostrophische Windvektoren 300 hPa	VAG300			

abs.: absolut
rel.: relativ
Top.: Topographie

Alle VA-Felder enthalten nur die positive Vorticityadvektion

1. Einleitung und Problemstellung

Jet-Streams sind wichtige Erscheinungen in der Synoptik. Es handelt sich um Starkwindbänder in der oberen Troposphäre, in deren Verlauf Windgeschwindigkeitsmaxima auftreten, die man Jet-Streaks nennt (REITER 1961; PALMEN und NEWTON 1969). Die deutschen Bezeichnungen „Strahlstrom“ und „Strahlstrommaximum“ sind zwar bekannt, aber nicht so geläufig wie die englischen Ausdrücke, die in dieser Arbeit im weiteren verwendet werden sollen.

Jet-Streams und Jet-Streaks begegnet man in verschiedenen Teilbereichen der Meteorologie: In der theoretischen Synoptik sind diverse Modellvorstellungen formuliert worden, in der Satellitenmeteorologie kennt man typische Bewölkungsformationen (ANDERSON et al. 1969; WELDON 1979; ZWATZ-MEISE 1987; ZWATZ-MEISE and G. MAHRINGER 1990), und in der Vorhersage sind Jet-Streams ein wichtiger Faktor, denkt man etwa an die Flugmeteorologie. Trotzdem ist, gerade für die Vorhersage, das Phänomen noch nicht endgültig abgeklärt und einer routinemäßigen Anwendung zugeführt. Es fehlt vor allem eine Zusammenführung der verschiedenen Jet-Streak- und Jet-Stream-Betrachtungsweisen, die zu einer erweiterten Betrachtungsweise führen muß.

In diesem Sinne seien folgende Ziele der vorliegenden Arbeit formuliert:

A. Ausgehend von Bewölkungsphänomenen in Satellitenbildern sollen Modellvorstellungen auf ihre praktische Anwendbarkeit hin getestet und, nach einer Verknüpfung der unterschiedlichen synoptischen Quellen, umfassende dreidimensionale konzeptionelle Modelle satellitensynoptischer Jet-Streak-Kategorien formuliert werden; diese sollen als Unterstützung der Diagnose in der praktischen Synoptik dienen.

B. Eine statistische Untersuchung des Auftretens dieser satellitensynoptischen Jet-Streak-Kategorien im Bereich Atlantik und Europa innerhalb eines Jahres soll die synoptische Signifikanz der Phänomene

abklären und eventuell vorhandene immer wiederkehrende Besonderheiten aufzeigen.

C. Eine Untersuchung der prognostischen Möglichkeiten von Jet-Streak-Phänomenen soll in zwei Richtungen erfolgen: die Anwendbarkeit der abgeleiteten konzeptionellen Modelle mit Hilfe des routinemäßig vorhandenen Materials und die Verbesserung der Niederschlagsvorhersagen. Beide Problemstellungen haben das Ziel einer besseren Interpretation sowie einer Detaillierung der numerischen Modellvorhersagen.

2. Grundlegende Modelle und typische Bewölkungskonfigurationen im Zusammenhang mit Jet-Streaks

2.1. Ein konzeptionelles Jet-Streak-Modell

Als ein für diese Arbeit grundlegendes Jet-Streak-Modell wurde jenes von UCCELLINI und JOHNSON (1979) gewählt. Es soll auf seine Anwendbarkeit für eine Erklärung typischer Bewölkungskonfigurationen in Jet-Streaks überprüft werden, ebenso wie auf seine Nutzungsmöglichkeit im operationellen Dienst.

Abbildung 1 zeigt die wesentlichsten Vorstellungen des Modells. Zunächst seien die Bedingungen im Jet-Niveau zusammengefaßt:

1. Entsprechend der erhöhten horizontalen Windscherung im Zentrum eines Jet-Streak existiert ein Maximum zyklonaler Vorticity unmittelbar auf der zyklonalen, ein Maximum antizyklonaler Vorticity auf der antizyklonalen Seite des Jet-Streak-Zentrums.
2. Als Folge dieser Vorticityverteilung ist auf der zyklonalen Seite stromabwärts ein Maximum von positiver Vorticityadvektion (PVA) festzustellen – das ist in der sogenannten linken „exit region"; weiters ein Maximum von negativer Vorticityadvektion (NVA) stromaufwärts in der linken „entrace region". Auf der antizyklonalen Seite ist diese Verteilung umgekehrt mit NVA in der rechten „exit region" und PVA in der rechten „entrance region"
3. Gemäß der Beziehung (1)

   $$(1)\ \nabla\ \vec{v} = -\ \frac{V}{\zeta_a}\ \frac{\partial\, \zeta_a}{\partial\, s}$$ Symbole siehe Tafel 1

   ist die in einem Niveau vorhandene PVA dort mit Divergenz, NVA mit Konvergenz verbunden; daraus ergibt sich eine der Verteilung der Vorticityadvektion entsprechende Verteilung von Konvergenz- und Divergenzmaxima im Jet-Streak.
4. Die Luft, die in einen Jet-Streak einströmt, wird in der „entrance region" beschleunigt und beim Ausströmen aus dem Jet-Streak in der „exit region" gebremst; daher treten dort ageostrophische Windkomponenten auf, die in der „entrance region" untergeostrophisch und daher von der antizyklonalen zur zyklonalen Seite gerichtet sind, in der „exit region" übergeostrophisch sind und daher von der zyklonalen zur antizyklonalen Seite weisen.

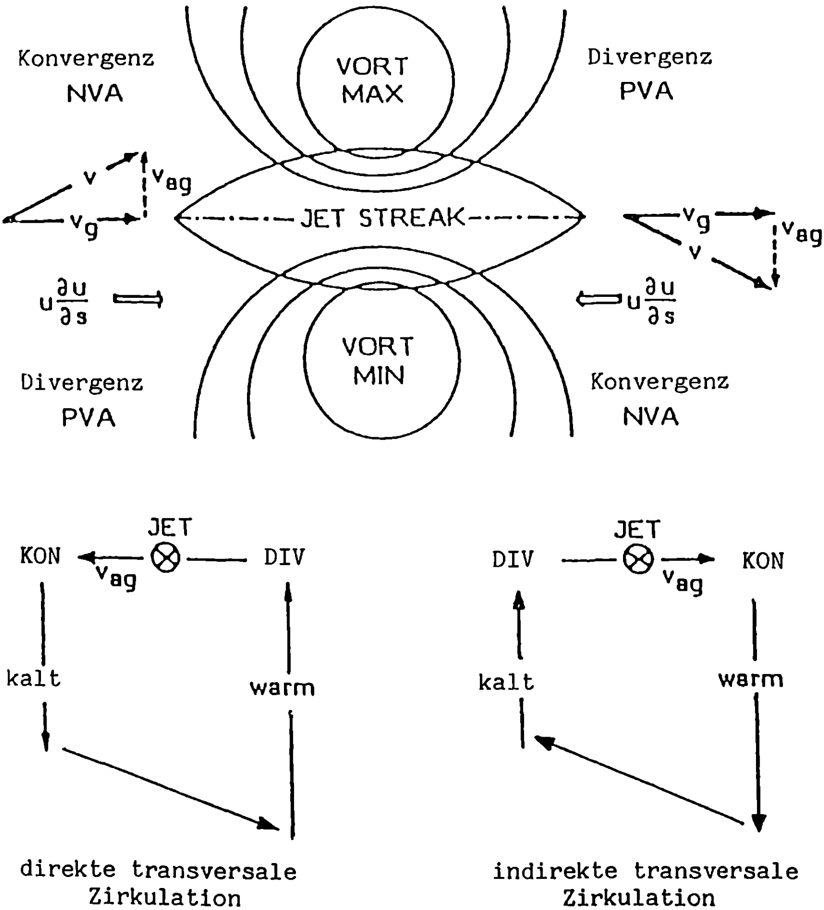


Abb. 1: Jet-Streak-Modell von UCCELLINI und JOHNSON; Schema. Oben: Jet-Niveau, unten: vertikale Querschnitte durch „entrance region" (links) und „exit region" (rechts). VORT: Vorticity; v, u: Komponenten des zweidimensionalen Windvektors; v_g: geostrophischer Wind; v_{ag}: ageostrophischer Wind; s: Stromlinienelement; KON: Konvergenz, DIV: Divergenz.

Dieser Verteilung im Jet-Niveau entsprechen typische Verteilungen in tieferen Niveaus, so daß sich Zirkulationszellen quer zur Strömung ergeben:

1. Insbesondere findet man dort, wo im Jet-Niveau Divergenz (Konvergenz) anzutreffen ist, in mittleren Niveaus Konvergenz (Divergenz). Konvergenz ist bei Jet-Streak Fällen i. a. mit Aufsteigen, Divergenz mit Absinken in diesen und den angrenzenden Niveaus verbunden.
2. Daraus ergibt sich in der „exit region" eine Querzirkulation mit einer Strömung von der zyklonalen zur antizyklonalen Seite im Jet-Niveau,

Absinken auf der antizyklonalen Seite, einer Querströmung von der antizyklonalen zur zyklonalen Seite in tieferen Niveaus und Aufsteigen auf der zyklonalen Seite; letzteres ist der Bereich der linken „exit region"

3. Völlig analog dazu ergibt sich in der „entrance region" eine Querzirkulationszelle, die im Jet-Niveau von der antizyklonalen zur zyklonalen Seite weist, auf der zyklonalen Seite, also in der linken „entrance region", von Absinken begleitet ist, in tieferen Niveaus von der zyklonalen zur antizyklonalen Seite weist und auf der antizyklonalen Seite im Bereich der rechten „entrance region" Aufsteigen beinhaltet.
4. Die Zirkulationszelle in der „exit region" ist indirekt, was bedeutet, daß durch adiabatische Erwärmung beim Absinken auf der antizyklonalen, warmen Seite sowie Abkühlen beim Aufsteigen auf der zyklonalen, kalten Seite die Temperaturgegensätze verschärft werden; solch eine Zirkulation wirkt daher frontogenetisch.
5. Die Zirkulationszelle in der „entrance region" bewirkt hingegen durch die Abkühlung beim Aufsteigen auf der antizyklonalen, warmen Seite und die adiabatische Erwärmung beim Absinken auf der zyklonalen, kalten Seite eine Abschwächung der Temperaturgegensätze und ist somit frontolytisch.

Zusammenfassend aus den angeführten Punkten ergibt sich, daß zwei Bereiche innerhalb der Jet-Streaks besonders prädestiniert für die Ausbildung von Bewölkung sein können: das Gebiet der linken „exit region" und das der rechten „entrance region" Wegen der frontogenetischen Wirkung kommt jedoch der linken „exit region" besondere Bedeutung zu. Die Gültigkeit und Anwendbarkeit dieses Modelles könnte also mit Satellitenbildern bestätigt werden, und, da Parameterverteilungen angesprochen sind, die auch im synoptischen Routinedienst vorhanden sind, kann die Untersuchung auf eine praktische Anwendung hinzielen.

2.2. Kleinräumige Rotationen unmittelbar unter der Jet-Achse

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich immer wieder gezeigt, daß ein konzeptionelles Modell für bestimmte kleinräumige Bewölkungskonfigurationen an bzw. nahe der Jet-Achse gebraucht würde. Eine bei WELDON (1979) angeführte, kleinräumige Zirkulation in der Höhe unter und an der Jet-Achse hat sich als geeignet erwiesen, solche Bewölkungskonfigurationen plausibel zu machen. Danach existiert unmittelbar unter dem Jet-Niveau Konvergenz mit Aufsteigen an der Jet-Achse und Absinken im zyklonalen Bereich; Abbildung 2 illustriert dies schematisch. Erhärtet wurde die Existenz dieser Zirkulation seinerzeit durch Satellitenfilme. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit konnte mit dem zur Verfügung stehenden meso- und synoptischskaligen Material keine Überprüfung der kleinräumigen Zirkulation mit numerischen Parametern durchgeführt werden. Andererseits unterstützten die Satellitenbilder diese konzeptio-

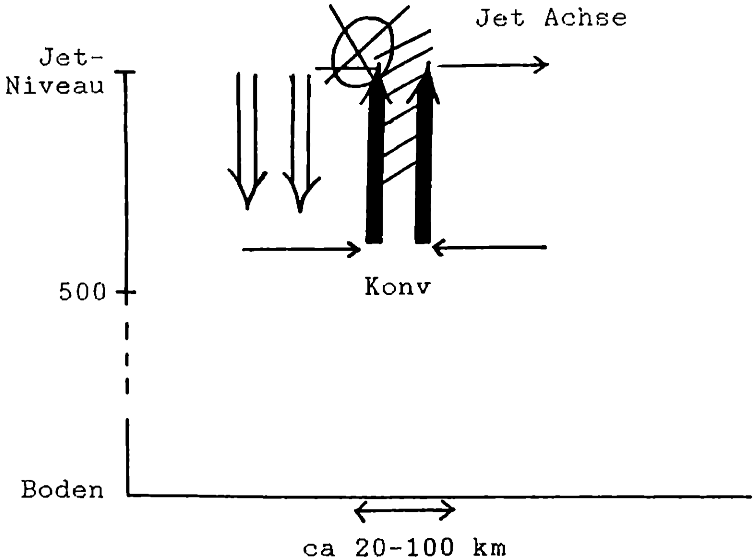


Abb. 2: Kleinräumige Zirkulationen unter der Jet Achse; Schema.
Pfeile: Vertikalbewegung; schraffiert: Wolkenfaser.

nelle Vorstellung sehr gut, so daß sie, kombiniert mit Überlegungen in synoptischem Scale, herangezogen wurde.

2.3. Kaltfrontmodelle: Das „conveyor belt"-Modell

Obwohl man meinen könnte, daß Kaltfrontmodelle nicht unbedingt für das Verständnis von Bewölkung in Zusammenhang mit Jet-Streaks nötig sind, hat sich im Zuge der Untersuchungen herausgestellt, daß manche satelliten-synoptische Phänomene gerade bei der Interaktion von Jet-Streaks mit Fronten auftreten. Daher scheinen einige kurze Bemerkungen zu Frontmodellen, soweit sie im folgenden zum Verständnis nötig sind, sinnvoll.

Zusätzlich zu den bekannten klassischen Modellvorstellungen der Ana- und Katafront (KURZ 1977), hat sich in den letzten Jahren eine andere Betrachtungsweise immer mehr eingebürgert: Das „conveyor belt"-Modell. Es war in der Lage, besser als alle anderen Modellvorstellungen, bestimmte großräumige Wolkenkonfigurationen zu erklären (CARLSON 1987). „Conveyor belts" sind Luftströmungen auf isentropen Flächen relativ zur Verlagerungsgeschwindigkeit des gesamten synoptischen Systems, der sogenannten Systemgeschwindigkeit.

Im Zusammenhang mit Fronten konnten drei relative Luftströme nachgewiesen werden (Abbildung 3). Im frühen Entwicklungsstadium (Abbildung 3a), etwa vergleichbar einem Wellenstadium, gibt es den sogenannten „warm conveyor belt", ein (relativ zur Systemgeschwindig-

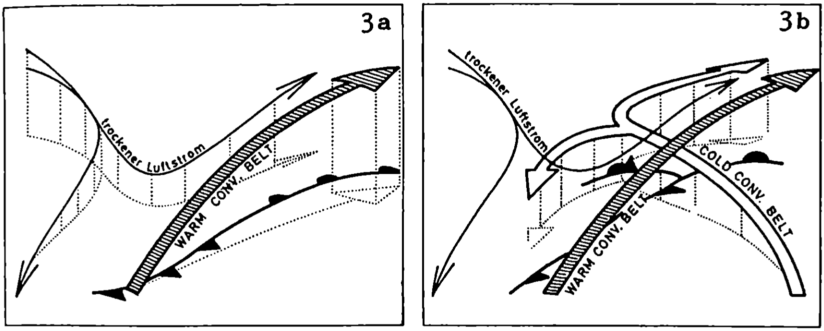


Abb. 3: Frontales „conveyor belt"-Modell; Schema.
3a: Wellenstadium; 3b: Okklusionsstadium. Erklärung siehe Text.

keit) von Süd bzw. Südost kommender und nach Nordost umbiegender, aufsteigender Luftstrom. In ihm bildet sich bei Erreichen der Sättigung das charakteristische Wolkenband vor bzw. über dem Bereich der Bodenkaltfront jedoch noch in der Warmluft, ferner über dem Warmsektor und der Warmfront. Die Begrenzung des „warm conveyor belt" zur trockenen Luft hin stimmt mit der Begrenzung des Wolkenbandes ebenso ausgezeichnet überein wie mit der Jet-Achse. Da das Aufsteigen in einer dicken Schichte erfolgt, sind auch Bewölkung und Niederschlagstätigkeit markant. Aus Nordwest kommt ein trockener Luftstrom, in der Literatur als „dry intrusion" bezeichnet, der auf der zyklonalen Seite der Jet-Achse nach Südost absinkt und sich schließlich in zwei Äste spaltet, einer biegt in eine südwestliche Richtung um und sinkt weiter ab und einer biegt in eine nordöstliche Richtung um, nähert sich dem „warm conveyor belt" und steigt parallel zu ihm wieder auf.

Ein späteres Entwicklungsstadium, etwa vergleichbar mit einem Okklusionsstadium (Abbildung 3b), zeigt noch einen dritten Luftstrom, den „cold conveyor belt", der von Osten kommt und im Bereich der Warmfront bzw. des Warmsektors unter dem „warm conveyor belt" nach Nordwesten aufsteigt. In ihm entsteht die Wolkenspirale der okkludierten Front. Auch der „cold conveyor belt" spaltet sich in einen aufsteigenden Ast, der nach Nordosten umbiegt und dort parallel zum „warm conveyor belt" führt, sowie in einen absinkenden Ast nach Südwest bis Südost, in dem sich die Wolkenspirale befindet, die, entsprechend dem Absinken, immer tiefere Wolkenobergrenzen aufweist und sich schließlich auflöst.

Das Arbeiten mit relativen Luftströmungen hat z. B. auch Aufschlüsse über einen bisher nicht beschriebenen Kaltfronttyp, die sogenannte „split front" (gespaltene Front) gegeben (BROWNING 1986; YOUNG und ZWATZ-MEISE 1986; KURZ 1986). Es handelt sich um eine Kaltfront, deren Bewölkungsband an der Vorderseite hochreichend ist, an der Rückseite jedoch nur tiefe Bewölkung aufweist und durch extrem

trockene Luft in der mittleren und oberen Troposphäre gekennzeichnet ist. Diese hängt mit der „dry intrusion" zusammen: Der absinkende, trockene, häufig Stratosphärenluft transportierende Luftstrom überlagert sich der Frontbewölkung und löst diese von oben her auf. Auch bei diesem Vorgang sind Jet und Jet-Streak maßgeblich beteiligt, denn die trockene Luft sinkt auf der zyklonalen Jet-Seite ab.

2.4. Typische Wolkenkonfigurationen in Satellitenbildern

2.4.1. Typische Jet-Stream-Bewölkung

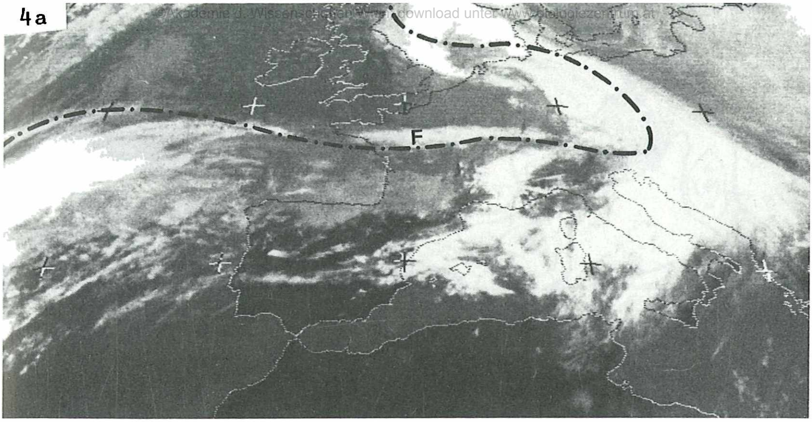
Als typische Jet-Stream-Bewölkung gilt vorwiegend hohe, faserige Bewölkung, wie sie in Abbildung 4 bei F zu sehen ist (ZWATZ-MEISE and G. MAHRINGER 1990). Dabei erkennt man verschiedene Erscheinungsformen. Sehr eindrucksvoll sind einzelne Wolkenfasern unterschiedlicher Längserstreckung (Abbildung 4a, b), die direkt an oder sehr nahe bei der Jet-Achse auftreten. Oftmals werden sie als Mittel für die Lokalisation der Jet-Achse herangezogen. Ihre physikalischen Hintergründe sind nicht restlos geklärt, jedoch scheinen die in 2.2. erwähnten kleinräumigen Rotationen mit Konvergenz und Aufsteigen unterhalb der Jet-Achse und Absinken im zyklonalen Teil ein geeignetes Vorstellungsmodell zu sein. Weiterführende Untersuchungen und Aussagen können dem Kapitel 4.4. entnommen werden.

Ein anderes häufiges Phänomen sind Wolkenbänder auf der antizyklonalen Seite der Jet-Achse, die aus hoher, faseriger Bewölkung bestehen und an der Jet-Achse eine scharfe Begrenzung aufweisen (S in Abbildung 4c). Solche Wolkenbänder wurden auch als „Scherungsbänder" bezeichnet, was ihre Lage im antizyklonalen Scherungsbereich des Jet-Stream ansprechen sollte (ZWATZ-MEISE und HAILZL 1980). Mit den Modellvorstellungen der „conveyor belts" ausgerüstet, scheint man nun eine sehr gute physikalische Erklärung für die Formation der Scherungsbänder in der Hand zu haben, welche demnach eine optische Manifestation für einen aufsteigenden relativen Luftstrom sind.

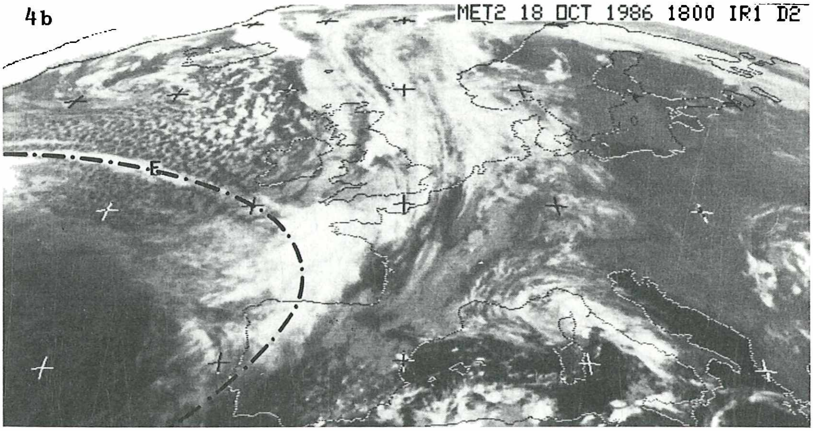
Ebenso wie zusätzlich zu Jet-Stream- und Jet-Streak-Modellen noch andere Modellvorstellungen herangezogen werden müssen (2.1. bis 2.3.), hat die intensive Diagnose der Satellitenbilder gezeigt, daß auch noch andere Bewölkungskonfigurationen als die oben angeführten mit Jet-Streaks in Zusammenhang stehen. Daher müssen an dieser Stelle noch weitere, in den folgenden Kapiteln verwendete Wolkenkonfigurationen beschrieben werden.

Abb. 4: Typische Jet-Stream-Bewölkung: Wolkenfasern.
Satellitenbilder: IR, Meteosat. Strichpunktierte Linie: Nullinie der Scherungsvorticity in 300 hPa als Maß für die Jet Achse. 4a: 2. 3. 87/12 UTC; 4b: 18. 10. 86/18 UTC; 4c: 25. 3. 86/18 UTC.

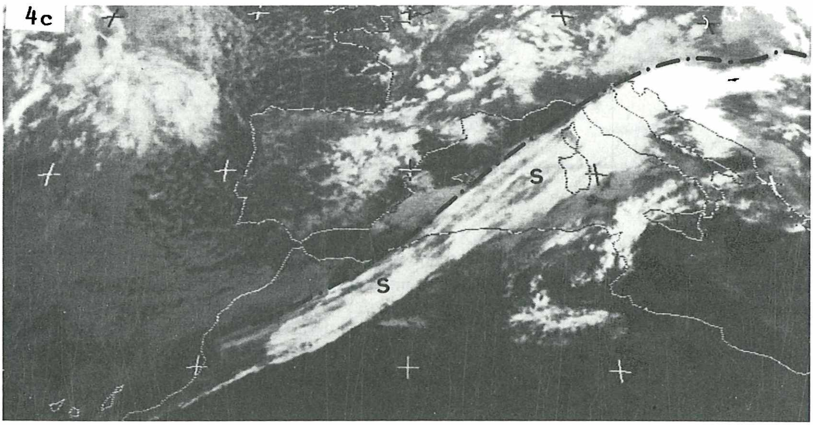
4a



4b



4c



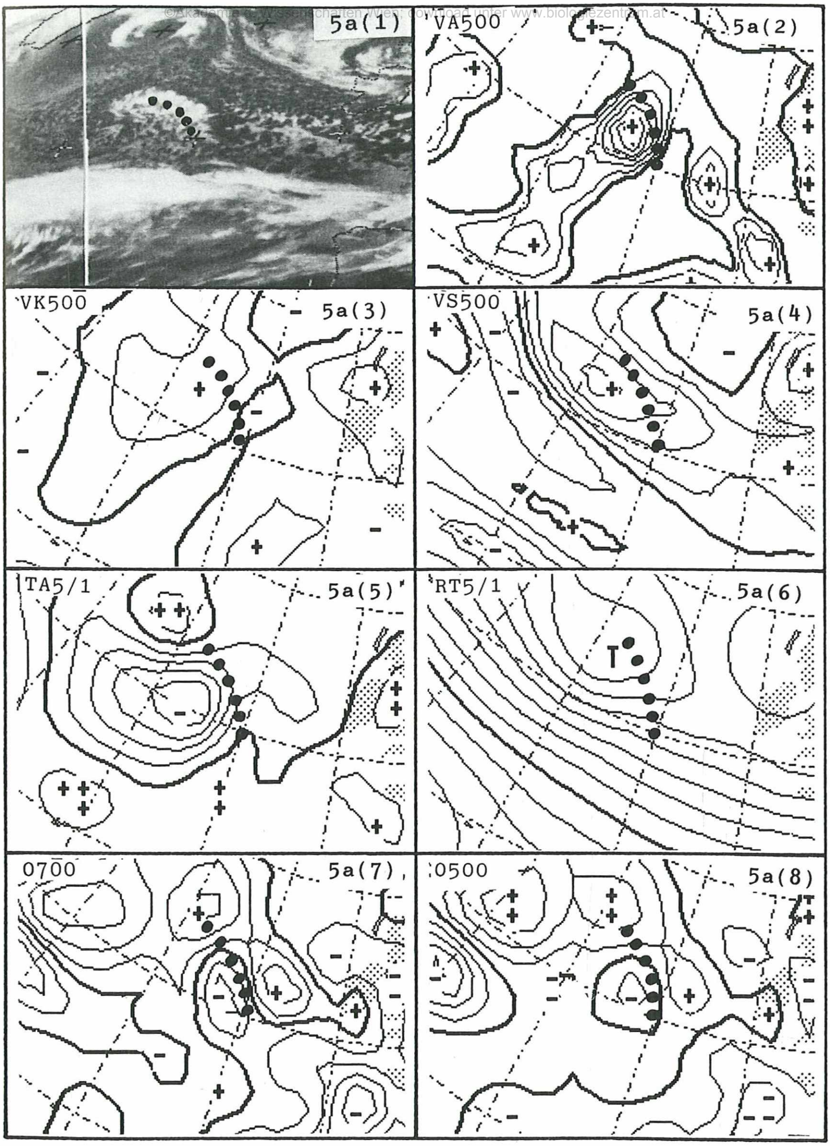
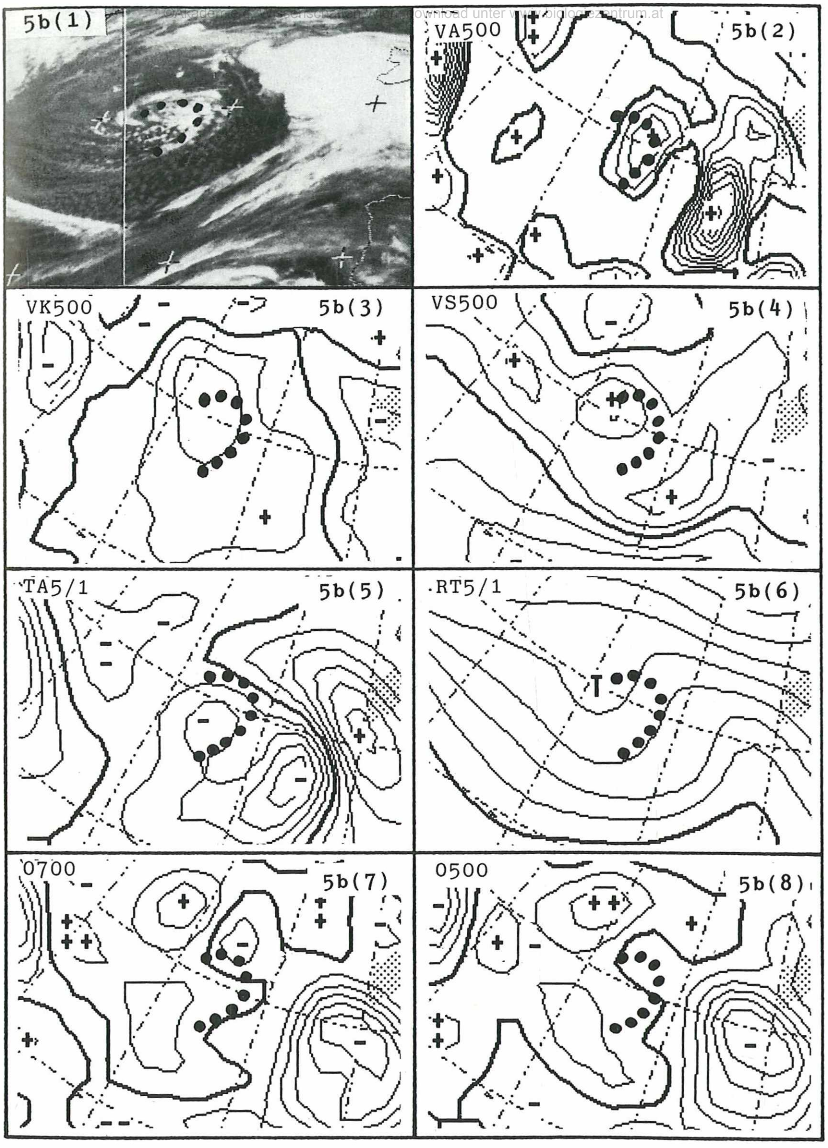


Abb. 5: Beispiele für EC und Komma-Bewölkung.
5a: EC; 12. 11. 87/12 UTC; 5b: Komma; 2. 3. 89/00 UTC. (1): Satellitenbilder: IR, Meteosat. Punktierte Linie: Mittlere Position der relevanten Bewölkungskonfiguration aus dem Satellitenbild. Parameter: (2): PVA 500 hPa; (3): Krümmungsvorticity 500 hPa; (4): Scherungsvorticity 500 hPa; (5): Advektion der rel. Top. 500/1000 hPa; (6): rel. Top. 500/1000 hPa; (7): Omega 700 hPa; (8): Omega 500 hPa. Magnitude, Dimensionen und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.



5b(1)
VA500
5b(2)
VK500
5b(3)
VS500
5b(4)
TA5/1
5b(5)
RT5/1
5b(6)
0700
5b(7)
0500
5b(8)

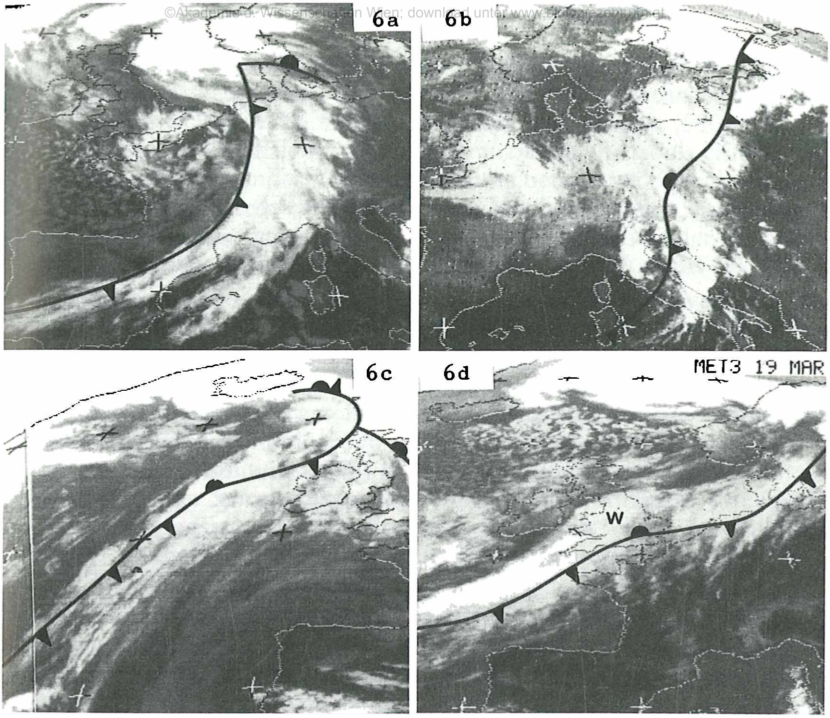


Abb. 6: Typische Wolkenbänder bei Kaltfronten.
Satellitenbilder: IR, Meteosat. Frontsymbole: TFP (vgl. Kapitel 3). 6a: 8. 10. 87/03 UTC; 6b: 7. 7. 86/00 UTC; 6c: 19. 12. 87/15 UTC; 6d: 19. 3. 90/15 UTC.

2.4.2. Die Bewölkungskonfigurationen „EC“ und „Komma“

„Enhanced Cumuli“ (EC) und Komma (K) (Abbildung 5a[1], b[1]) sind mesoscale Bewölkungskonfigurationen, die meist stark konvektiven Charakter haben. In ihrer vollen Bedeutung sind sie erst durch Satellitenbilder erkannt worden.

Während EC-Konfigurationen aus einer Anhäufung gegenüber der Umgebung vertikal verstärkter Cumuluszellen ohne besondere Formierung bestehen, weisen Kommas mehr oder weniger markante Wirbelstrukturen auf. Bezüglich ihrer Entstehung gibt es mehrere Modellvorstellungen (HARROLD and BROWNING 1969; RASMUSSEN 1977; REED 1977), die jeweils andere Eigenschaften von Komma-Konfigurationen ansprechen bzw. erklären können. Heute kann einigermaßen gesichert behauptet werden, daß beide Konfigurationen eng mit Vorticity- und Vorticityadvektionsfeldern in Zusammenhang stehen. Die vertikale Zunahme der Vorticityadvektion liefert gemäß der Vorticitygleichung (PICHLER 1984) einen Beitrag zum Aufsteigen und somit auch zu einer eventuellen Bewölkungsbildung. Aus der Praxis der Satellitenmeteorologie heraus hat sich eine vereinfachte Diagnosemethode entwickelt. Setzt

man nämlich eine Zunahme des Windes mit der Höhe voraus, was ja in der Atmosphäre i. a. gegeben ist, so kann man die deutlichen Maxima positiver Vorticityadvektion (PVA) in höheren Niveaus (500 oder 300 hPa) anstelle der vertikalen Änderung heranziehen und sie als Hinweis für Gebiete mit aufsteigender Vertikalbewegung betrachten. Gleichzeitig hat sich gezeigt und wurde durch zahlreiche Untersuchungen untermauert, daß PVA-Maxima häufig zusammen mit EC- und/oder Komma-Konfigurationen auftreten (ANDERSON et al. 1969; FORBES 1982).

Man kann sich folgenden Vorgang bei der Ausbildung von EC- und Komma-Strukturen vorstellen: Die Verlagerung zyklonaler Vorticitymaxima in der Höhe hat stromabwärts die Ausbildung deutlicher PVA-Maxima zur Folge. Diese bewirken Aufsteigen oder tragen zu diesem bei, was innerhalb einer labil geschichteten Atmosphäre zur Ausbildung von EC-Formationen führen kann. Die zyklonale Vorticity bewirkt, je nach ihrem Krümmungsanteil, eine Formierung des EC-Bewölkungssystems zu einer Spiralstruktur, also eine Kommaformation. Die Größe des Krümmungsanteiles der Vorticity hat somit einen wesentlichen Einfluß auf die Form dieser Bewölkungskonfiguration (ZWATZ-MEISE 1987; ZWATZ-MEISE and KRESS 1988 a, b).

Typischerweise findet man hohe Werte der Krümmungsvorticity in Trog- und Tiefdruckbereichen, so daß EC und Komma bevorzugt im Höhentrog unmittelbar vor der Trogachse und somit auch in der Kaltluft bzw. unter dem Einfluß von Kaltluftadvektion (KLA) auftreten. Letztere macht deutlich, daß man aus der Existenz eines PVA-Maximums allein nicht eindeutig auf aufwärts gerichtete Vertikalbewegung schließen darf, denn das Absinken, das mit KLA i. a. verbunden ist, wirkt entgegen und kann auch überwiegen. Vom Gesichtspunkt der Satellitenmeteorologie aus kann aber der umgekehrte Schluß als weitgehend gesichert gelten, nämlich der von der vorhandenen Wolkenkonfiguration EC und/oder Komma auf die Existenz von zyklonalen Vorticity- und PVA-Maxima in der Höhe.

In Abbildung 5a, b (2)–(8) sind die Feldverteilungen der eben erwähnten Parameter den Satellitenbildern beigefügt, so daß ihre Beziehungen zu den Wolkenkonfigurationen eingesehen und überprüft werden können. Weitere Beispiele dazu können dem Kapitel 4.1. entnommen werden.

Wie die späteren Untersuchungen zeigen werden, treten die hier beschriebenen Wolkenkonfigurationen nicht nur im bzw. vor den Bereichen starker zyklonaler Krümmung wie z. B. im Höhentrog auf, sondern auch in Gebieten mit viel schwächerer Krümmungsvorticity, wenn Vorticity und PVA in einem Jet-Streak mitwirken. Es sind dies dann EC-Formen oder Kommas mit schwach ausgeprägter Spiralstruktur.

2.4.3. Typische Kaltfrontbewölkung und Wellen

Die Variationsbreite im Erscheinungsbild frontaler Wolkenbänder ist groß; Abbildung 6 kann nur einige Beispiele wiedergeben: ein

typisches meridional orientiertes, zyklonal gekrümmtes Wolkenband (Abbildung 6a), ein großräumig antizyklonal gekrümmtes (Abbildung 6c), ein eher uneinheitliches Wolkenband (Abbildung 6b) und schließlich ein Wolkenband mit einer wellenförmigen Ausbuchtung an der Rückseite (Abbildung 6d).

Obwohl Kaltfronten ein in der Synoptik relativ gut erfaßtes und erfaßbares Phänomen sind (ZWATZ-MEISE and G. MAHRINGER 1987; ZWATZ-MEISE and HUFNAGL 1990), ist die Erfassung von Unterstrukturen oder Modifikationen bei weitem noch nicht zufriedenstellend gelöst. Die Durchführung internationaler Kaltfrontexperimente zeugt davon (HOINKA 1987; BROWNING and TESTUD 1986).

Wendet man die in 2.3. angeführten Frontmodelle an, so manifestieren die Bewölkungsbänder natürlich das Aufgleiten der Luft an der Frontfläche (Ana- oder Katafront) bzw. im Bereich des „warm conveyor belts". Demgemäß stellt es auch den Übergangsbereich zwischen Kalt- und Warmluftadvektion (KLA-WLA) dar.

Das in Abbildung 6d bei W beobachtbare Phänomen an der Rückseite frontaler Wolkenbänder tritt häufig auf; es handelt sich, wie allgemein bekannt, um Wellen, also Bereiche, in denen sekundäre Zyklogenese stattfindet. Jedoch gibt es auch hier verschiedene Typen. Während die eben beschriebene Konfiguration im Zusammenhang mit sekundärer Zyklogenese relativ zum Kaltfrontwolkenband etwa ortsfest bleibt und sich verwirbelt, gibt es wellenförmige Formationen, die sich rasch am rückwärtigen Rand des Wolkenbandes stromabwärts verlagern. Wie gezeigt werden wird, sind es die letzteren, die in Zusammenhang mit Jet-Streaks stehen und sich durch einen ganz anderen physikalischen Zustand der Atmosphäre von den klassischen Wellen unterscheiden. Sie werden in Abschnitt 4.3. ausführlich dargestellt werden.

3. SATMOD – die verwendete Methodik

SATMOD (**Sat**ellite Images and **Mod**el Output **D**iagnosis) ist eine an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien (ZAMG) seit vielen Jahren mit Erfolg für die Diagnose synoptischer Situationen angewandte grundlegende Methodik (KRESS und ZWATZ-MEISE 1980a, b; ZWATZ-MEISE , HAILZL and KRESS 1983; ZWATZ-MEISE 1985; ZWATZ-MEISE and G. MAHRINGER 1990; G. MAHRINGER and ZWATZ-MEISE 1991). Es handelt sich dabei um eine interaktive Auswertung von Wolkenkonfigurationen in Satellitenbildern zusammen mit Feldverteilungen diverser relevanter meteorologischer Parameter. Letztere werden sowohl aus den Gitterpunktswerten numerischer Modelle als auch aus aktuellen Messungen wie z. B. Radiosondendaten abgeleitet. Die physikalische Grundlage für die Auswahl der relevanten Parameter sind konzeptionelle Modelle. Mittels SATMOD werden auch alle Untersuchungen in dieser Arbeit durchgeführt.

Zunächst scheinen an dieser Stelle noch einige grundsätzliche Bemerkungen bezüglich einer Auswertung von Satellitenbildern ange-

bracht. Bei der in dieser Arbeit dargestellten Methode geht es um die Erfassung und Auswertung des optischen Eindruckes von Wolkenkonfigurationen: das Erkennen von Signaturen („pattern recognition"). Diese müssen auf ihren Zusammenhang mit relevanten meteorologischen Parametern hin untersucht werden. Der Grundgedanke beruht auf dem Wissen, daß bestimmte physikalische Zustände der Atmosphäre zu typischen Bewölkungskonfigurationen führen, die zu erkennen im Bild nach entsprechender Einschulung und Berücksichtigung einer gewissen Variationsbreite relativ einfach ist. Es ist dies quasi ein optischer „first guess" für das Vorhandensein bestimmter physikalischer Bedingungen.

Trotz mehrerer Versuche einer objektiven Erkennung von Bewölkungssignaturen, wie sie hier behandelt werden, hat sich gezeigt, daß die subjektive Erfassung durch den Meteorologen derzeit noch immer rascher, umfassender und detailreicher ist. Zwar ist es unbestritten, daß aus der Subjektivität auch Unsicherheiten erwachsen können, aber diese haben sich nicht als gravierend erwiesen und lassen sich durch die Hinzunahme von Parameterfeldern bzw. Anwendung von konzeptionellen Modellen weitgehend ausschalten. Dies wurde auch in einem Workshop über die derzeitige und zukünftige Verwendung von Satellitendaten (Eumetsat 1990) bestätigt. Dabei wurden als „Rolle des menschlichen Vorhersagers" neben objektiven Methoden unter anderem folgende Punkte formuliert:

- Erfassung von Konfigurationen;
- Klassifikation von synoptischen Situationen;
- Auswahl relevanter Felder/Informationen;
- Synthese von Satellitendaten mit anderen verfügbaren Daten in Form konzeptioneller Modelle.

Neben dieser Bearbeitung von Satellitenbildern gibt es die quantitativen Methoden der Satellitenbildauswertung. Quantitativ erfaßbare Größen im Satellitenbild sind Graustufen, Verlagerungswege von Wolkenkonfigurationen und die Größe der Flächen bestimmter Graustufen. Die Erfassung der großräumigen synoptischen Situation, wie sie durch die Analysen und Vorhersagen numerischer Parameter dargestellt wird, ist dabei keine grundlegende Voraussetzung.

Beide Arbeitsweisen, die halbautomatische SATMOD-Methode, bei der der Meteorologe interaktiv mit den verschiedenen Datenquellen arbeitet, und die vollautomatischen quantitativen Methoden sind notwendig und sollten kombiniert werden.

Die im Rahmen von SATMOD verwendeten Parameter können in dieser Arbeit entsprechend ihrer Verfügbarkeit für prognostische oder diagnostische Zwecke in zwei Gruppen unterteilt werden. Dabei wurde vom derzeitigen Stand eines Wetterdienstes ausgegangen, wie ihn z. B. die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) in Wien repräsentiert.

1. Grundlegende Parametergruppe:

   Darunter fallen alle Parameter auf isobaren Flächen, die aus den Gitterpunktswerten numerischer Modelle (hier das Modell von EZMW) abgeleitet werden und auch prognostisch zur Verfügung stehen:

   absolute Topographien
   relative Vorticity: unterteilt in Krümmung und Scherung
   absolute Vorticityadvektion
   relative Topographien
   thermische Vorticity: unterteilt in Krümmung und Scherung
   Temperaturadvektion (Advektion der rel. Top.)
   thermischer Frontparameter (TFP)
   Isotachen
   relative Feuchte und Feuchteindices
   Divergenz
   Vertikalbewegung
   Labilitätsindices

   Alle Parameter können für mehrere Hauptdruckflächen (Boden bis 300 hPa) bzw. für Schichten verschiedener Dicke berechnet werden, und zwar sowohl aus numerischen Analyse- als auch Vorhersagefeldern mit einer derzeitigen Gitterdistanz von ca. 150 km. Sie stehen somit diagnostisch und prognostisch zur Verfügung.

2. Erweiterte Parametergruppe:

   Darunter fallen alle Parameter und Parameterdarstellungen, die in einem Wetterdienst üblicherweise (hier wieder bezogen auf die ZAMG) derzeit noch nicht operationell und/oder prognostisch zur Verfügung stehen. So z. B. Parameter, die relativ zu einer Systemgeschwindigkeit und/oder auf isentropen Flächen berechnet werden:

   ageostrophische Windvektoren auf isobaren Flächen
   relative Windvektoren auf isobaren Flächen
   Querschnitte äquivalent-potentieller Temperaturen
   Isobaren auf isentropen Flächen
   relative Stromlinien auf isentropen Flächen
   Vertikalbewegung auf isentropen Flächen

   Diese Parameter bzw. Darstellungen stehen jedoch diagnostisch für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung und bilden einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit.

Die meisten in der ersten Gruppe angeführten Parameter sind Allgemeingut der Synoptiker und bedürfen keiner näheren Erklärung. Lediglich die Frontlokalisation mit Hilfe des thermischen Frontparameters (TFP) und die parametermäßige Erfassung der Jet-Achse sollen näher erläutert werden. Mit dem thermischen Frontparameter (2) (RENARD and CLARKE 1965; HUBER-POCK and KRESS 1989; ZWATZ-MEISE and HUFNAGL 1990)

$$(2)\ TFP = -\nabla(\nabla T) \cdot \frac{\nabla T}{|\nabla T|}$$ Symbole siehe Tafel 1

wird die Änderung des Temperaturgradienten in Richtung des Temperaturgradienten berechnet. Für das Temperaturfeld T kann sowohl die Temperatur einer Fläche als auch einer Schichte (relative Topographie) verwendet werden. Der in dieser Arbeit berechnete TFP benutzt eine äquivalente relative Topographie der Schichte 500/850 hPa, die sich von der üblichen relativen Topographie durch einen Zuschlag unterscheidet, der die Kondensationswärme, die freiwerden kann, berücksichtigt (HUBER-POCK and KRESS 1989).

Ausgehend von der klassischen Frontdefinition ist eine Kaltfront dort zu lokalisieren, wo die Temperatur zu fallen beginnt, eine Warmfront dort, wo ein Temperaturanstieg aufhört. Dies ist an der jeweils „warmen Seite" von Drängungszonen in der relativen Topographie, welche üblicherweise die Fronten begleiten. Da dort die Änderung des Temperaturgradienten und somit auch der TFP maximal ist, wird eine Front also dort lokalisiert, wo der TFP ein Maximum aufweist. Im folgenden wird unter der Abkürzung TFP (aus Gründen der Einfachheit) das Maximum der aus (2) berechneten Werte verstanden.

Eine genaue Lokalisation der Jet-Achse ist natürlich nur aufgrund von aktuellen Flugzeugmessungen möglich; trotzdem hat sich eine numerische Methode sehr bewährt: Die Lokalisation der Jet-Achse als Nullinie der relativen Scherungsvorticity in 300 hPa (manchmal auch zusätzlich 500 hPa). Zwar wird man damit nicht immer das genaue Jet-Niveau erfassen, dennoch aber eine sehr brauchbare Annäherung erhalten. Zusammen mit Isotachen in diesen Niveaus erreicht man eine gute Darstellung des Jet-Streaks. Abbildung 7 stellt Isotachen gegenüber,

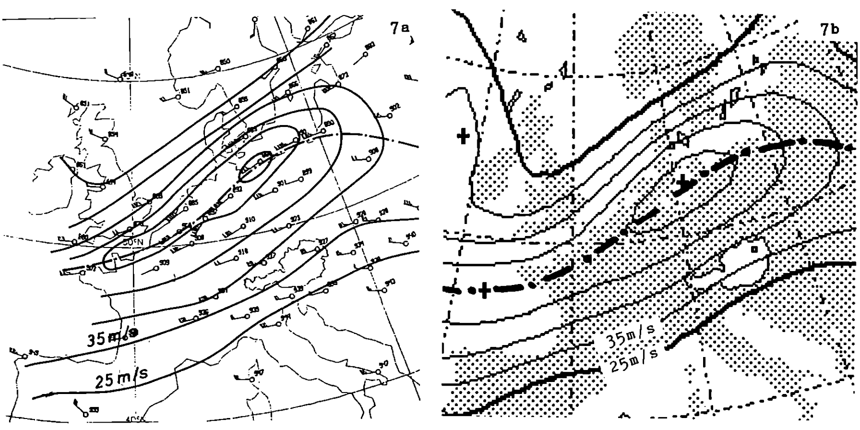


Abb. 7: Erfassung von Jet-Streaks aus EZMW Daten.
23. 10. 86/00 UTC. 7a: Radiosondendaten 300 hPa, strichpunktiert: Jet Achse, ausgezogen: Isotachen; 7b: EZMW Daten 300 hPa, strichpunktiert: Nullinie der Scherungsvorticity, ausgezogen: Isotachen. Magnitude, Dimensionen und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.

die einerseits aus Radiosondenaufstiegen, andererseits aus den angeführten numerischen Feldern bestimmt wurden.

Zu zwei Parametern aus der „erweiterten Parametergruppe“ sind ebenfalls einige zusätzliche Bemerkungen nötig, und zwar zur Bestimmung der Systemgeschwindigkeit und zur Auswahl der isentropen Flächen.

Systemgeschwindigkeiten, also Geschwindigkeiten, mit denen sich das synoptische System verlagert, werden aus der Verlagerung der zugehörigen Wolkenkonfigurationen in Satellitenbildern sowie der Verlagerung relevanter numerischer Parameter (z. B. Vorticityzentren) bestimmt. Obwohl gerade die Bewölkung kein zeitlich invariabler Parameter ist, hat die Erfahrung gezeigt, daß die Methode bei Verwendung eines nicht allzu langen Zeitraumes (z. B. 6 Stunden zentriert auf den mittleren Zeitpunkt) sehr brauchbar ist. Die Ergebnisse sind gegenüber Variationen der Systemgeschwindigkeit relativ unempfindlich. Eine Problematik, die sich allerdings ergibt, ist die Wahl des Niveaus, dem man die als Tracer ausgewählten Wolkenphänomene zuordnet.

Ein anderer Problemkreis taucht bei der Arbeit mit potentieller und/oder äquivalent-potentieller Temperatur auf. Der große Vorteil einer Betrachtungsweise auf isentropen Flächen ist die dreidimensionale Darstellung der Bewegungsvorgänge, denn unter der Annahme adiabatischer Verhältnisse bewegen sich Luftpakete auf isentropen Flächen. Da letztere gegen die isobaren Flächen geneigt sind, können Vertikalbewegungen direkt abgelesen werden. Jedoch beginnen die Probleme bereits bei der Wahl zwischen potentieller oder äquivalent-potentieller Temperatur. Verwendet man die potentielle Temperatur Θ (3), so vernachlässigt man die Feuchte, was für Bewölkungssituationen sicher nicht richtig ist. Verwendet man die äquivalent-potentielle Temperatur Θ_e (3), so trägt man zwar der Feuchte Rechnung, durch ihre hohe Variabilität kann es jedoch zu sehr uneinheitlichen Verläufen der isentropen Flächen mit Höhenmehrdeutigkeiten kommen, was zu unrealistischen Gradienten und damit zu einer Überschätzung der Vertikalbewegung und einer Fehleinschätzung der Situation führen kann. Abbildung 8 zeigt anhand eines Beispiels den Unterschied beider potentieller Temperaturen ebenso wie Problembereiche innerhalb der äquivalent-potentiellen Temperatur.

Eine Minimierung solcher Fehler kann nur durch eine sorgfältige Auswahl der isentropen Flächen für den jeweils betrachteten Bereich, z. B. mit Hilfe von vertikalen Querschnitten, erfolgen. Dies ist im folgenden immer durchgeführt worden. Außerdem wurde, um feuchten und trockenen Situationen innerhalb eines Falles gleichermaßen gerecht zu werden, eine etwas modifizierte Form der äquivalent-potentiellen Temperatur verwendet Θ_{ek} (3), bei der im Exponenten die Temperatur des Kondensationsniveaus steht. Damit wurde erreicht, daß trockene und feuchte isentrope Flächen bis zum Kondensationsniveau parallel sind, darüber aber automatisch die feuchten berechnet werden.

(3) $\Theta = T\left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{r}{c_p}}$; $\Theta_e = \Theta_e{}^{\frac{r q_m}{c_p T}}$; $\Theta_{ek} = \Theta_e{}^{\frac{r q_m}{c_p T_k}}$ Symbole siehe Tafel 1

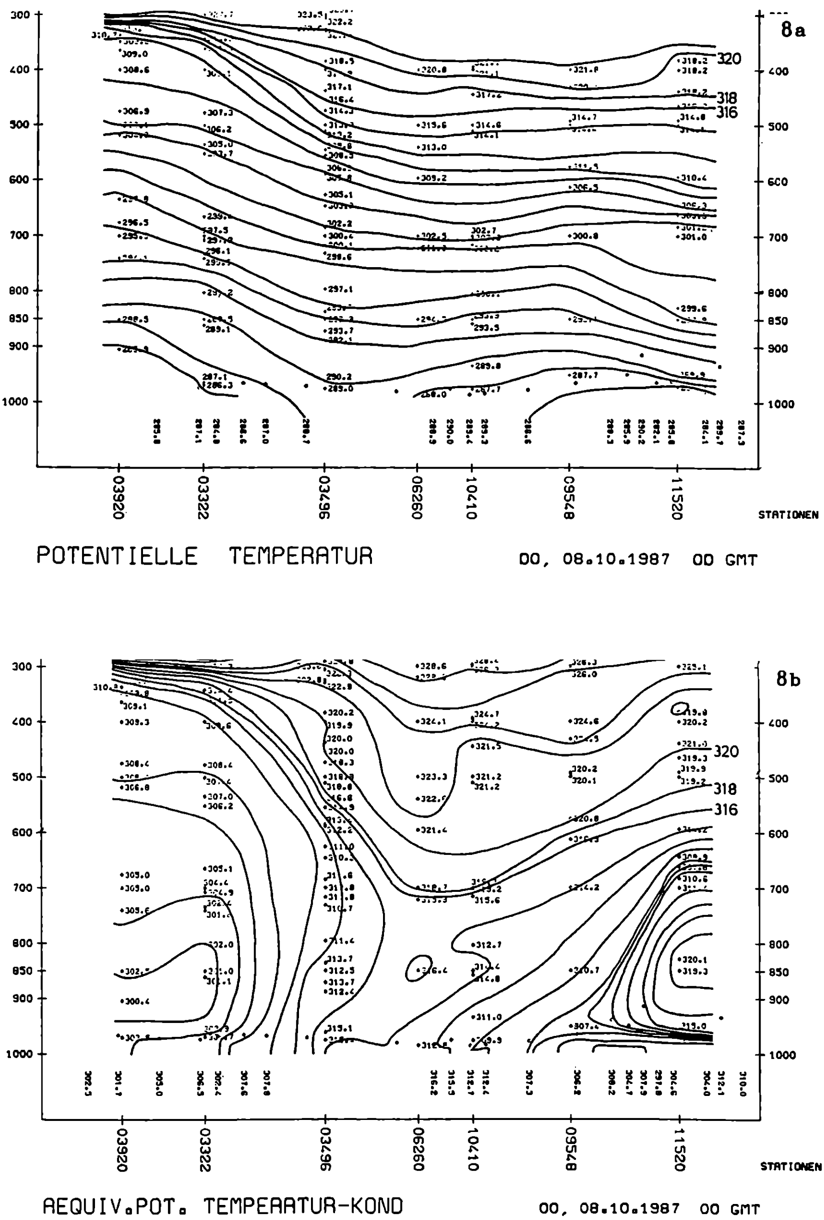


Abb. 8: Vergleich von potentieller und äquivalent-potentieller Temperatur anhand eines vertikalen Querschnittes. 8. 10. 87/00 UTC. 8a: potentielle Temperatur; 8b: äquivalent-potentielle Temperatur (modifizierte Form, siehe Text und [3]).

Die Überlagerung bzw. gemeinsame Betrachtung von Wolkenkonfigurationen in Satellitenbildern einerseits und relevanten Parametern andererseits führt zur Entwicklung „konzeptioneller Modelle", die den typischen physikalischen Zustand der Atmosphäre, der der Anlaß typischer Wolkenkonfigurationen ist, beschreibt. Ausgerüstet mit dem Wissen solcher Modelle kann der Synoptiker aus den im Satellitenbild identifizierbaren Konfigurationen auf den jeweiligen physikalischen Zustand schließen und diesen mittels der für ihn operationell verfügbaren Parameter (z. B. aus der grundlegenden Parametergruppe) bestätigen.

4. Entwicklung konzeptioneller Modelle für satelliten-synoptische Jet-Streak-Kategorien

Dieses Kapitel soll zusammengefaßte und schematisch dargestellte Ergebnisse zur Problemstellung A aus Kapitel 1. liefern. Dazu wurden alle Jet-Streak-Episoden eines Jahres (1986) im Bereich Atlantik – Europa mit der SATMOD-Methode diagnostiziert; und zwar zunächst mit den Modellparametern der „grundlegenden Parametergruppe" Die Ergebnisse sind in Kapitel 5. statistisch zusammengestellt und von der Fallanzahl her durchaus repräsentativ. Die Untersuchungen mit den Parametern aus beiden Gruppen sind, des wesentlich größeren Aufwandes wegen, naturgemäß nicht so zahlreich, lassen aber gemeinsame physikalische Grundzüge erkennen. Die im folgenden schematisch dargestellten konzeptionellen Modelle sind ein zusammenfassendes Ergebnis aller durchgeführten Fallstudien einer Kategorie und werden jeweils durch ein typisches und/oder interessantes Beispiel demonstriert.

4.1 EC oder Komma in der linken „exit region"

Wie in 2.4.2 schon erwähnt, hat die Untersuchung gezeigt, daß man EC-oder Komma-Konfigurationen auch losgelöst von Fronten und ihren zugehörigen Trogbereichen, wo sie üblicherweise erwartet werden, findet, nämlich in der linken „exit region" von Jet-Streaks. Es gibt mehrere typische synoptische Situationen dafür: z. B. starke zonale Strömungen, denen kurzwellige Tröge überlagert sind, oder intensive N- bis NW-Strömungen auf der Rückseite von Höhentrögen, also hinter den Bereichen maximaler Krümmungsvorticity. Ein gemeinsames Charakteristikum ist das Zusammenwirken von Krümmung und Scherung, wobei während des Ablaufes einer Episode häufig zu beobachten ist, daß sich das PVA-Maximum zunächst vor einem deutlichen Scherungsvorticitymaximum befindet, sich jedoch im weiteren der Krümmungsanteil und somit die kurzwellige Störung intensivieren. Folglich sind gegen Ende der Episode beide Faktoren zumindest gleich wesentlich. Hand in Hand mit diesen Entwicklungen geht eine Verstärkung der Wirbelstruktur der Wolkenkonfiguration vor sich.

Diese satelliten-synoptische Konfiguration ist somit nicht allein von der Jet-Streak-Zirkulation abhängig, letztere hat aber einen wesentlichen Einfluß. Um dies deutlich zu machen, seien zunächst einige Beispiele wiedergegeben.

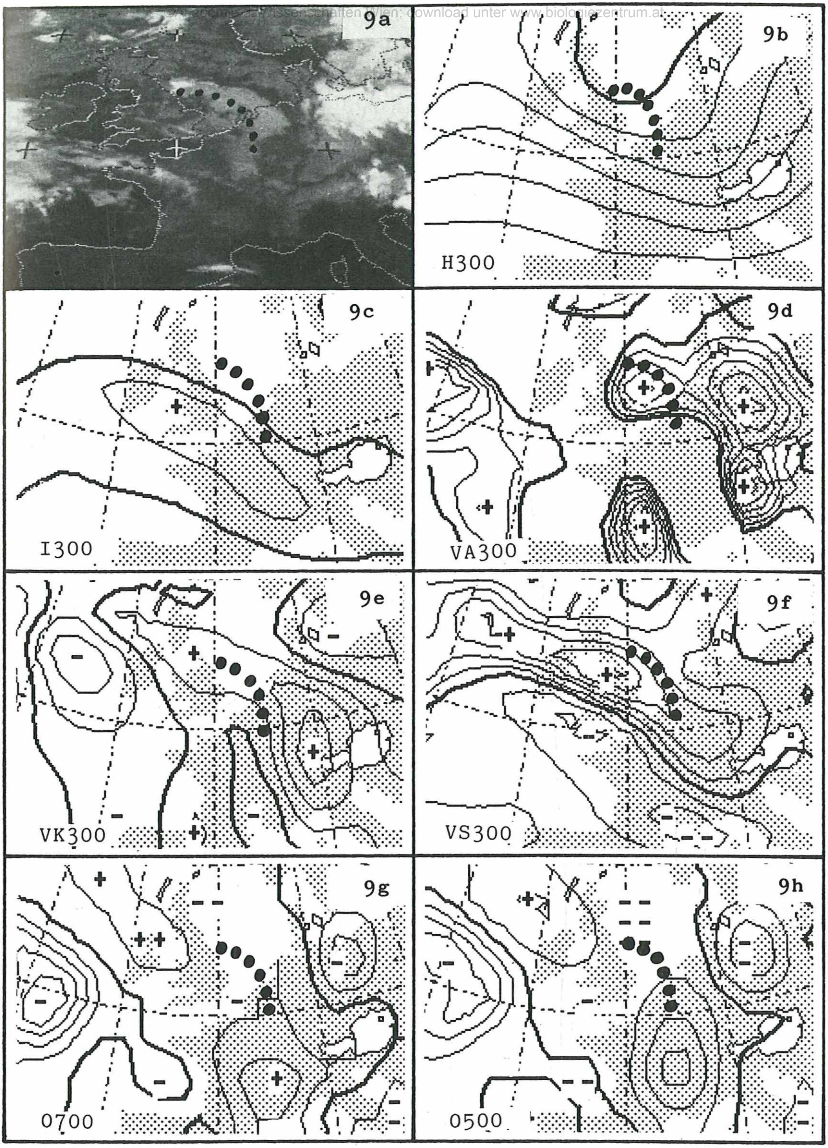


Abb. 9: Komma in linker „exit region": 20. 8. 86/00 UTC.
9a: IR, Meteosat; 9b: abs. Top. 300 hPa; 9c: Isotachen 300 hPa; 9d: PVA 300 hPa; 9e: Krümmungsvorticitiy 300 hPa; 9f: Scherungsvorticity 300 hPa; 9g: Omega 700 hPa; 9h: Omega 500 hPa. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3. Punktierte Linie: Mittlere Position der Komma-Konfiguration aus dem Satellitenbild.

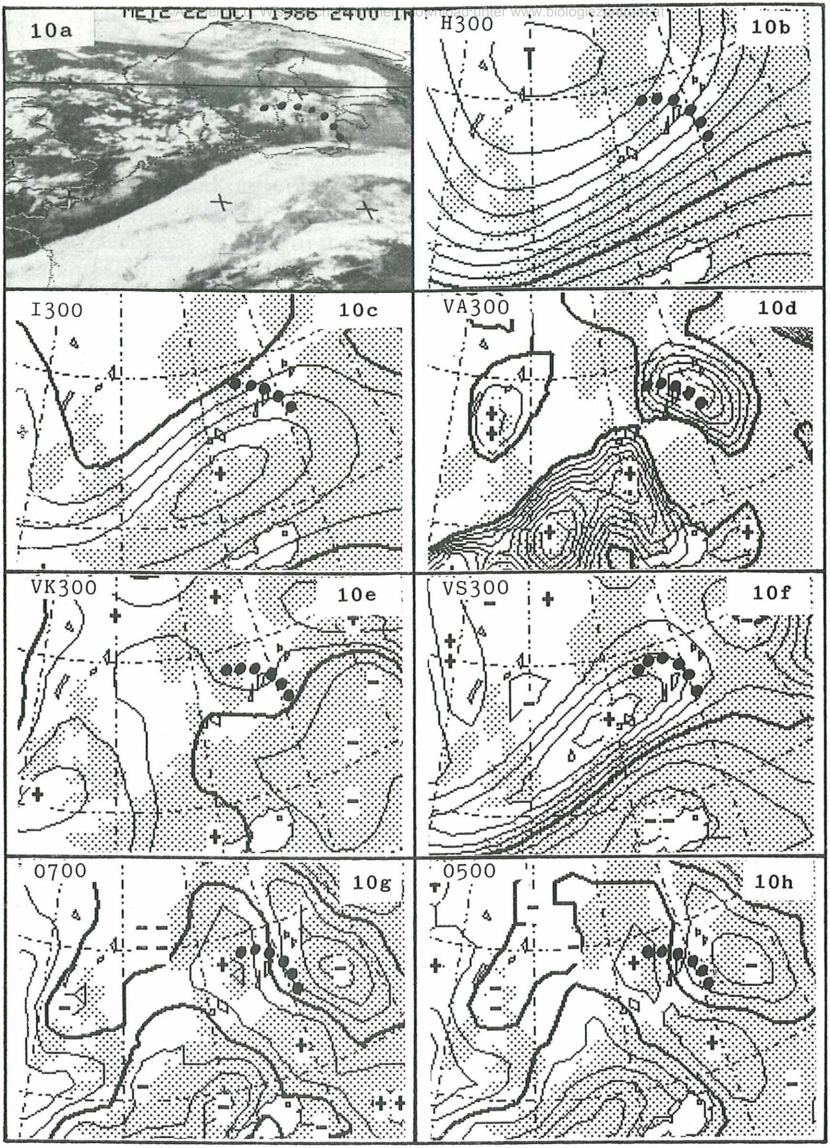


Abb. 10: Komma in linker „exit region": 23. 10. 86/00 UTC.
10a: IR, Meteosat; 10b: abs. Top. 300 hPa; 10c: Isotachen 300 hPa; 10d: PVA 300 hPa; 10e: Krümmungsvorticity 300 hPa; 10f: Scherungsvorticity 300 hPa; 10g: Omega 700 hPa; 10h: Omega 500 hPa. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3. Punktierte Linie: Mittlere Position der Komma-Konfiguration aus dem Satellitenbild.

Das erste Beispiel zeigt in Abbildung 9 eine kräftige Strömung aus W bis NW, die vom Atlantik von ca. 15 W aus einem Höhenkeil heraus bis Mitteleuropa führt, wo sie bei ca. 10 E in einen Höhentrog mündet. Dem nördlichen Teil der breiten Strömung ist im Bereich Schottland und Mittelengland ein kleinräumiger Höhentrog überlagert. Die weiteren Felder dieser Abbildung (9a, c–h) zeigen im Bereich Benelux–Nordsee bis Mittelengland durch die punktierte Linie ein Wolkenfeld, das mit einem PVA-Maximum in 300 hPa in der Nordsee übereinstimmt. Letzteres liegt in Strömungsrichtung unmittelbar vor einem Maximum von Scherungs- und Krümmungsvorticity, wobei der zyklonale Scherungsanteil weit überwiegt. Die Lage der PVA- und NVA-Gebiete relativ zum Jet-Streak entspricht den Modellvorstellungen recht gut: PVA in der Nordsee befindet sich in der linken, NVA im Bereich Ärmelkanal und Bretagne in der rechten „exit region", PVA südlich von Irland in der rechten und NVA über bzw. nördlich von Irland in der linken „entrance region". Die Felder der Vertikalbewegung zeigen für diesen Fall und Zeitpunkt überhaupt kein Aufsteigen an; der einzige Hinweis auf die mit dem PVA-Maximum ausgezeichnet übereinstimmende Bewölkungsformation ist eine Schwächezone im großräumigen Gebiet mit Absinken. Es sei hier bereits angeführt, daß sich in weiterer Folge auch in den EZMW-Feldern Aufsteigen einstellt, was bei der ausführlichen Fallstudie vom 20. August 1986/12 UTC (Abbildung 13) eingesehen werden kann. Dabei wird auch die bereits erwähnte Intensivierung der Krümmungsvorticity zu beobachten sein.

Das zweite Beispiel ist in Abbildung 10 wiedergegeben. Es handelt sich um eine breite, überwiegend geradlinige Höhenströmung mit südwestlicher Richtung, die parallel zu einer Front liegt. Letztere wird noch in Kapitel 4.3. von einem anderen Gesichtspunkt her betrachtet. Für die hier behandelte Problematik interessiert das Wolkengebiet über Südschweden und der Ostsee (punktierte Linie in Abbildung 10a). Auch in diesem Fall ist die Übereinstimmung von Wolkenkonfiguration, PVA-Maximum und linker „exit region" deutlich zu erkennen. Der Anteil der Scherungsvorticity mit einem Maximum über Norddänemark ist markant, während der Krümmungsanteil eher schwach ist. Aber auch in dieser Episode nimmt die Krümmungsvorticity während der nächsten zwölf Stunden zu (hier nicht weiter gezeigt), was sich in einer Verstärkung der Wirbelstruktur der Bewölkung spiegelt.

Ein drittes Beispiel ist in Abbildung 11 wiedergegeben. Die Bewölkungskonfiguration, die von Süd- und Mittelengland in die Nordsee reicht, hat sich ca. 12 Stunden vorher aus einer stark verwirbelten Wolkenspirale eines Tiefdruckwirbels abgespalten und ist mit der Strömung in die linke „exit region" des in Abbildung 11c wiedergegebenen Jet-Streaks gesteuert worden. Dabei ist es unter dem Einfluß von PVA insbesondere im Teilbereich 1 zu einer Bewölkungsverstärkung gekommen, während sich die Bewölkung in Teil 2 aufzulösen beginnt, was bis 12 UTC vollzogen ist. Der Anteil der Krümmungsvorticity ist naturgemäß in diesem Fall größer als in den beiden vorangegangenen

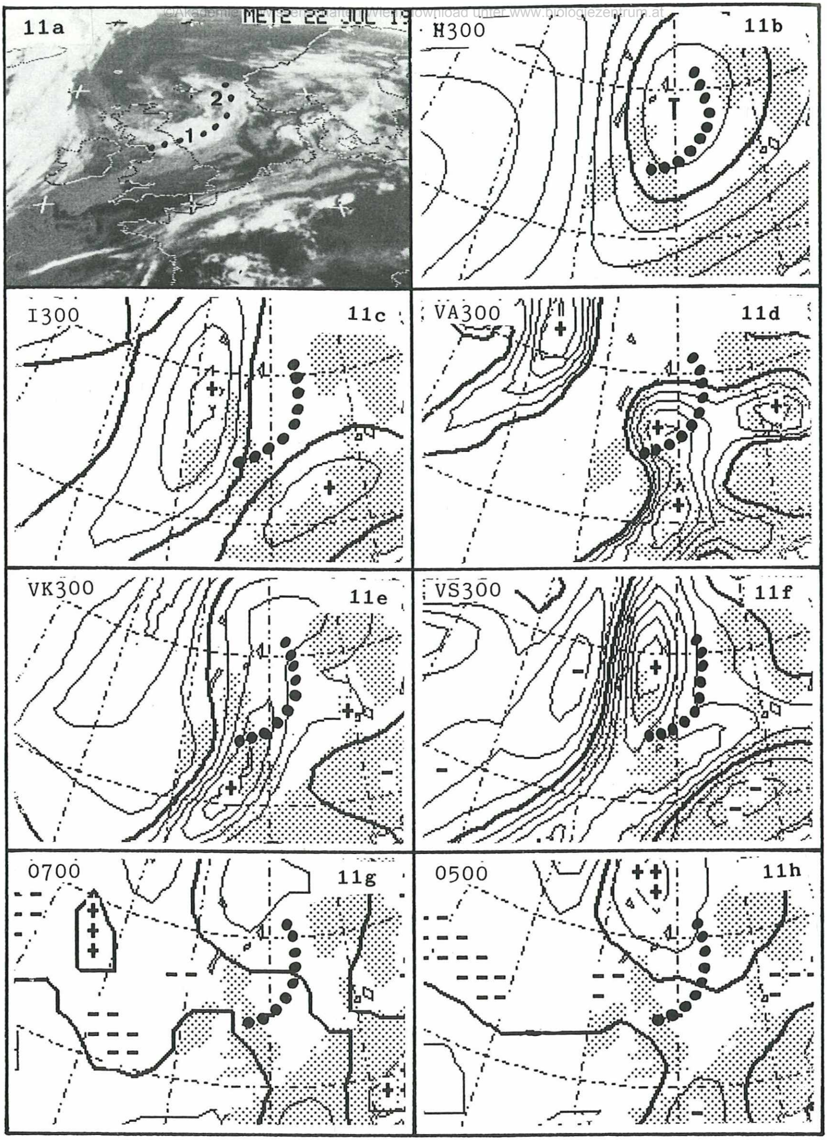


Abb. 11: Komma in linker „exit region": 23. 7. 86/00 UTC.
11a: IR, Meteosat; 11b: abs. Top. 300 hPa; 11c: Isotachen 300 hPa; 11d: PVA 300 hPa; 11e: Krümmungsvorticity 300 hPa; 11f: Scherungsvorticity 300 hPa; 11g: Omega 700 hPa; 11h: Omega 500 hPa. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3. Punktierte Linie: Mittlere Position der Komma-Konfiguration aus dem Satellitenbild.

Fällen, ihr eigentliches Maximum ist jedoch mehr im Süden, hinter der Front, zu finden und nicht im Bereich der Wolkenkonfiguration.

Zusammenfassend zu diesen drei Beispielen ist zu sagen, daß Wolkenkonfigurationen in der linken „exit region“ von Jet-Streaks mit deutlichen PVA-Maxima vor markanten Maxima der Scherungsvorticity zusammenfallen. Aber auch zyklonale Krümmungsvorticity, meist in Verbindung mit einem kurzwelligen Trog, ist vorhanden, ja sie gewinnt im Laufe einer Episode häufig sogar an Bedeutung, was sich in der Formierung einer Wolkenspirale manifestiert.

Komma- und EC-Bewölkungskonfigurationen sind meist äußerst wetterwirksame Phänomene, die mit gegenüber der Umgebung vermehrten Schauern, Cb-Bewölkung und Gewittern für synoptische Signifikanz sorgen. Außerdem haben sie eine Lebensdauer, die zumindest eine sehr kurzfristige (2—12 Stunden), meist aber auch noch eine kurzfristige Vorhersage (24 Stunden) notwendig macht.

Alle diese Gründe sprechen dafür, eine genauere Vorstellung von der physikalischen Situation, die dabei in der Atmosphäre herrscht, zu gewinnen. Abbildung 12a gibt die aus allen Beispielen abgeleiteten, typischen Verhältnisse im Jet-Niveau wieder. Wie bereits mehrmals erwähnt, gibt es Abweichungen vom Jet-Streak-Modell bezüglich der Verteilung von PVA- und NVA-Maxima in der „exit region“, da PVA dort auch über die Jet-Achse auf die antizyklonale Jet-Seite reicht. Dies ist eine Folge der überlagerten Höhentröge, die einen zusätzlichen Krümmungsanteil der Vorticity bewirken und zu zyklonalen Werten der gesamten Vorticity auch auf der antizyklonalen Jet-Seite führen. Die größeren Werte von PVA sind jedoch nach wie vor im linken Teil der „exit region“ zu finden. Der erhöhte Krümmungsanteil der Vorticity manifestiert sich auch optisch in der Ausbildung einer Spiralstruktur des Wolkengebildes. In diese Vorstellung paßt auch die Tatsache, daß im Zusammenhang mit Jet-Streaks anfangs häufiger EC-artige Konfigurationen auftreten.

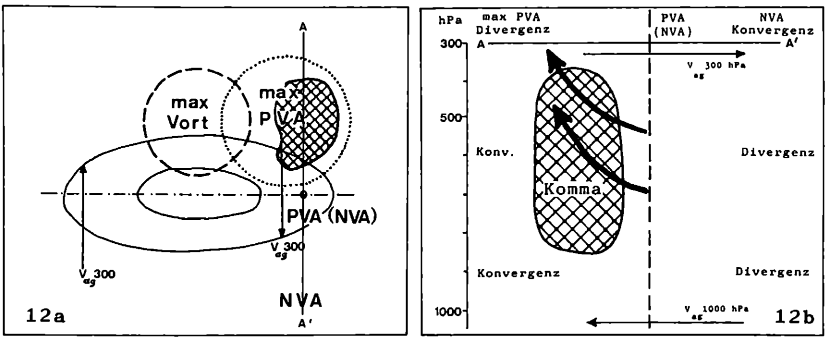


Abb. 12: Konzeptionelles Modell für EC (Komma) in linker „exit region“; Schema. 12a: Jet-Niveau; 12b: Vertikaler Querschnitt durch die „exit region“

Die Verteilung von Divergenz und Konvergenz entspricht derjenigen der Vorticityadvektion; insbesondere findet man Divergenz im Bereich des PVA-Maximums. Auch die ageostrophischen Windkomponenten zeigen sehr deutlich die zur Jet-Achse vorhandene Querströmung an, die in der „exit region“ und im Jet-Niveau von der zyklonalen zur antizyklonalen Seite gerichtet ist.

Abbildung 12b zeigt schematisiert die bei der Konfiguration Komma in linker „exit region“ typischerweise anzutreffende Zirkulationszelle. In der linken „exit region“ findet man Divergenz im Jet-Niveau, Konvergenz in der mittleren Troposphäre. Dementsprechend herrscht dort Aufsteigen, das sowohl auf isobaren als auch auf isentropen Flächen zu finden ist. Die Bewölkung des Kommas tritt häufig innerhalb einer vertikal unterschiedlich mächtig ausgedehnten, aber labil geschichteten Luftmasse auf. Daher drängt sich die Frage auf, ob die Jet-Streak-Zirkulation überhaupt etwas mit der Bewölkungsformation zu tun hat. Dies ist zu bejahen, denn die Konvergenz in der mittleren Troposphäre innerhalb der Jet-Streak-Zirkulation gibt Anlaß zu Vertikalbewegung. Das wird durch die entsprechenden Felder auf isobaren Flächen ebenso wie durch die vertikalen Querschnitte der äquivalent-potentiellen Temperatur untermauert. Isentropen zeigen sowohl einen Bereich durchmischter Luft an als auch, unmittelbar darüber, eine Neigung von der zyklonalen Jet-Seite unter der Jet-Achse durch auf die antizyklonale Seite. Auf diesen Flächen lassen die relativen Stromlinien im Bereich der Jet-Streak-Zirkulationszelle Aufsteigen erkennen. Sind Fälle dieser satelliten-synoptischen Kategorie mit einer hochreichend zellular aufgebauten Wolkenkonfiguration verbunden, so kann diese wohl nur innerhalb der labilen Luftmasse entstehen, wobei aber Bewölkung, die sich im Zuge des Aufsteigens auf den höher gelegenen Isentropenflächen bildet, überlagert sein kann. Besteht die Wolkenkonfiguration eher aus hoher Bewölkung, so ist diese wohl das Resultat des Aufsteigens auf den höheren Isentropenflächen, also entweder ohne labil geschichtete Luft oder ohne eine kräftige vertikale Zirkulationszelle. Letztere kann sich allerdings im Laufe einer Episode entwickeln. Wie Abbildung 12b wiedergibt, sind die ageostrophischen Windkomponenten im Jet-Niveau von der zyklonalen zur antizyklonalen Seite und in unteren Niveaus entgegengesetzt gerichtet.

Man kann somit feststellen, daß das auf seine Anwendbarkeit hin getestete Jet-Streak-Modell im Falle der satelliten-synoptischen Kategorie Komma in der linken „exit region“ für einige wesentliche Erscheinungen eine zutreffende Modellvorstellung ist, daß aber zusätzliche Bedingungen, insbesondere die Ausbildung kurzwelliger Tröge, mitspielen. Demgemäß müssen für die rechte „exit region“ Abweichungen vom Idealmodell angebracht werden: Das Übergreifen von (meist eher schwachen) zyklonalen Vorticitywerten und somit PVA über die Jet-Achse und das Fehlen einer deutlich absinkenden Luftströmung in diesem Bereich; letztere konnte in keinem Fall nachgewiesen werden.

Abbildung 13 gibt eine Fallstudie wieder, die die eben beschriebenen allgemeinen Bedingungen an einem realistischen Fall demonstriert: der Fall vom 20. 8. 86/12 UTC. Zunächst sind zur Fallauswahl einige ergänzende Bemerkungen nötig. Es handelt sich um einen Zeitpunkt innerhalb einer Jet-Streak-Episode, zu dem der Einfluß des kurzwelligen Troges bereits deutlich ist; dennoch wurde dieser Zeitpunkt für eine detaillierte Diagnose gewählt, und zwar aus zwei Gründen: Erstens aus einem praktischen, da geographische Lage und Zeitpunkt der Fallstudie optimale Datenverfügbarkeit gewährleisten, und zweitens aus fachlichen Gründen, da der Fall zeigen wird, daß mit dem verwendeten Material und Modell auch aus einer zunächst widersprüchlichen Lage des Kommas relativ zum Jet-Streak eine „exit region" richtig erkannt werden kann.

Das Satellitenbild (Abbildung 13a) zeigt über Deutschland eine Kommaformation, die im Gebiet 53,5N/8E–54N/12,5E–50,5N/7E–51N/10,5E die höchsten Graustufen (gewonnen aus Falschfarbendarstellungen) aufweist. Sie hat sich aus jener in Abbildung 9 entwickelt, und ihre Wetterwirksamkeit ist beachtlich (Abbildung 13b), denn es treten verbreitet Gewitter, Cb-Bewölkung und Schauer auf. Vergleicht man die Stationsmeldungen aus der Bodenwetterkarte, so zeichnen sich drei Bereiche ab: 1.) der eben abgegrenzte mit den kältesten Wolkenobergrenzen des Kommas, 2.) ein Streifen von ca. 1 Grad Breite auf seiner Rückseite und 3.) der Bereich mit tieferer zellularer Bewölkung vor, südlich und auf der Rückseite des 1.) und 2.) Bereiches zusammen. Im 1.) Bereich sind 57 % der 14 darin enthaltenen Stationsmeldungen Schauer und Gewitter, wobei letztere überwiegen; im 2.) Bereich sind 83 % der 6 Meldungen Schauer und Gewitter, jedoch fanden alle in der letzten Stunde statt, repräsentieren also die Verlagerung von Gebiet 1.); im 3.) Gebiet sind 67 % von 24 Meldungen ohne konvektive Bewölkung bzw. Wettererscheinungen. Es sei hier am Rande vermerkt, daß mit dem Komma bis 21 UTC Gewitter verbunden waren.

Abbildung 13c, die absolute Topographie in 300 hPa, zeigt eine breite Nordwest- bis Westströmung von England über West- und Mitteleuropa bis etwa Ungarn; westlich von Dänemark befindet sich ein Tiefdruckzentrum. Das Komma ist jedoch nicht in letzterem, sondern mehr in der breiten, zonalen Strömung zu lokalisieren, vor einem noch schwachen, kurzwelligen Trog in der Nordsee, unmittelbar vor der Küste der Benelux-Staaten.

Abbildungen 13d–g geben wichtige Parameter im Rahmen des Jet-Streak-Modelles wieder: Isotachen, Vorticity und Vorticityadvektion in 300 hPa. Man erkennt ein langgestrecktes Isotachenmaximum innerhalb dessen sich vom rein optischen Blickpunkt aus das Komma zunächst nicht in der linken „exit region" befindet, sondern eher in der Mitte. Bedeutet diese Tatsache nun einen Widerspruch zu den bisherigen Behauptungen, oder ist dieser Bereich, gegen den optischen Eindruck, vom physikalischen Standpunkt her doch eine „exit region"? Wie gezeigt werden kann und wird, trifft letzteres zu.

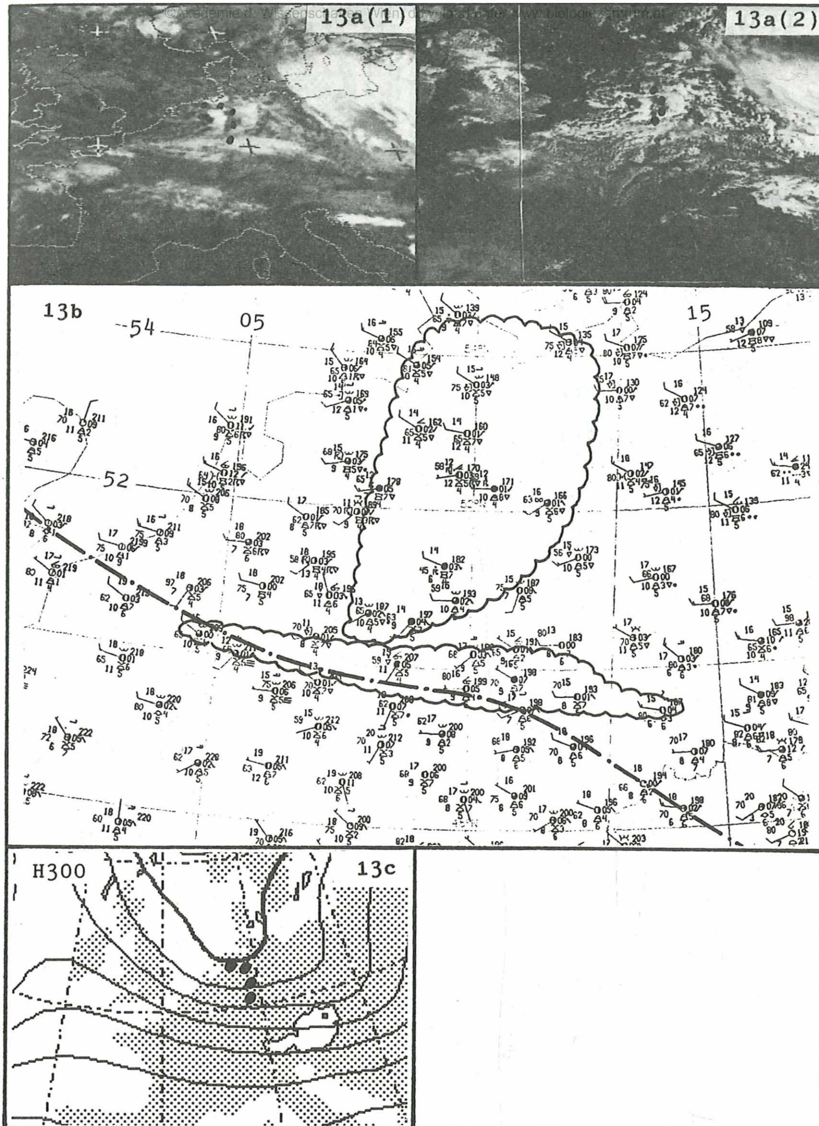
So zeigen die Isotachen in 500 hPa (Abbildung 13e) jene Bereiche innerhalb des langgestreckten Jet-Streaks in 300 hPa an, die auch noch in 500 hPa vorhanden und somit dicker sind; es sind dies quasi kleinere Jet-Streaks innerhalb eines großen. Der westlichere Kern um ca. 50N/05E hat seine „exit region" genau im Kommabereich. Auch Vorticity und Vorticityadvektion (Abbildungen 13f,g) sprechen dafür. Das Vorticitymaximum über der Nordsee und Holland (ca. 53N/05E) besteht zu zwei Dritteln aus Scherungsvorticity, und das Komma befindet sich in dem vorgelagerten PVA-Maximum. Dieses Beispiel zeigt auch die erwähnte Abweichung vom Idealmodell, nämlich das durch die Krümmungsvorticity des kurzwelligen Troges bedingte Übergreifen von PVA über die Jet-Achse in den antizyklonalen Bereich der „exit region", wobei die maximalen Werte auf der zyklonalen Seite sind.

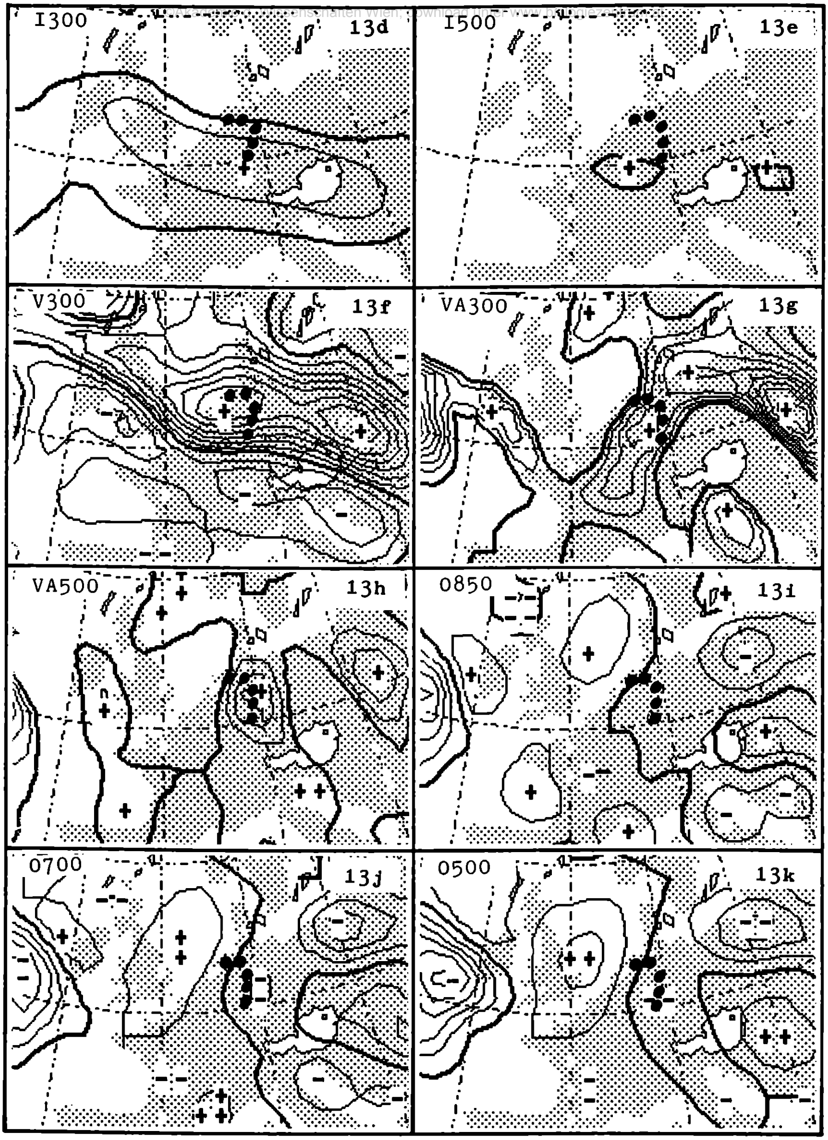
Vergleicht man die PVA-Maxima in 300 und/oder 500 hPa mit den ω-Feldern in 850, 700 und 500 hPa (Abbildungen 13g–k), so erkennt man den Vorteil der Arbeit mit Vorticityadvektionsfeldern bei den hier behandelten Wolkenkonfigurationen Komma und EC. Während die PVA-Maxima deutlich mit dem Komma (EC) zusammenhängen, zeigen die ω-Felder zwar Aufsteigen in allen drei Niveaus, jedoch ist das Maximum wesentlich weniger deutlich zuordbar.

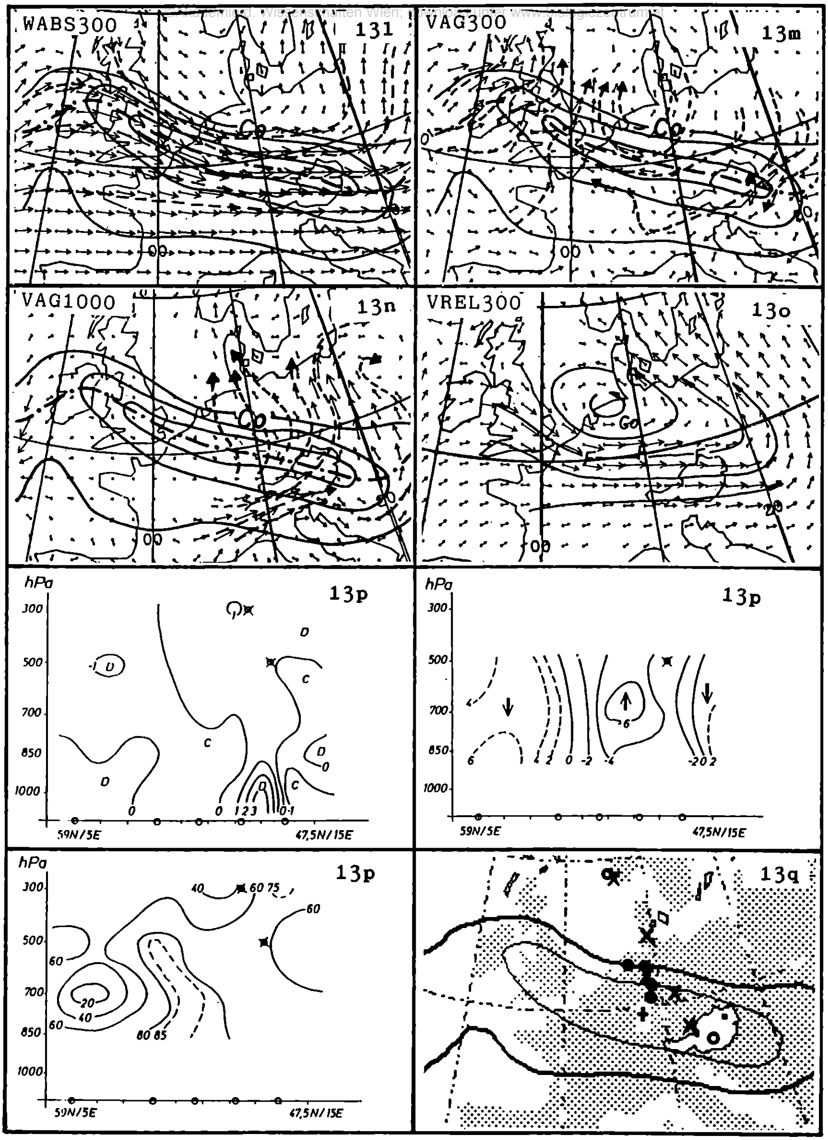
Die nächste Parametergruppe (Abbildungen 13l–o) enthält verschiedene Windfelder an den Gitterpunktswerten des EZMW-Modelles, die ebenfalls zur genaueren Lokalisation einer „exit region" herangezogen werden können: Die absoluten Stromlinien in 300 hPa (Abbildung 13l) und die ageostrophischen Windfelder (Abbildungen 13m, n). In einer „exit region" nimmt die Windgeschwindigkeit längs der Stromlinie ab; das ist entweder aus der Länge der Windvektoren abzulesen oder tritt dann auf, wenn die Stromlinien die Jet-Achse schneiden. Letztere Situation ist in diesem Beispiel gegeben. Gemäß dem Jet-Streak-Modell haben die ageostrophischen Komponenten durch die Abbremsung in der

---

Abb. 13: Komma in linker „exit region": 20. 8. 86/12 UTC.
13a: Meteosat, links: IR, rechts: VIS; 13b: Bodenwettermeldungen, Konturen relevanter Graustufen aus Falschfarbenbildern übertragen; 13c: abs. Top. 300 hPa; 13d: Isotachen 300 hPa; 13e: Isotachen 500 hPa; 13f: Vorticity 300 hPa; 13g: PVA 300 hPa; 13h: PVA 500 hPa; 13i: Omega 850 hPa; 13j: Omega 700 hPa; 13k: Omega 500 hPa; 13l: abs. Windvektoren 300 hPa, Isotachen (ausgezogen) und Nullinie der Scherungsvorticity 300 hPa (strichpunktiert) übertragen; 13m: ageostrophische Windvektoren 300 hPa, strichliert: Stromlinien; 13n: ageostrophische Windvektoren 1000 hPa, strichliert: Stromlinien; 13o: relative Windvektoren 300 hPa, Systemgeschwindigkeit: 290°/16 m/s, strichliert: Stromlinien; 13p: vertikale Querschnitte von Divergenz, Omega und relativer Feuchte aus EZMW-Daten durch Komma und „exit region" (D: Divergenz, C: Konvergenz, Pfeile: Aufsteigen bzw. Sinken); 13q: Skizze zur Lage der vertikalen Querschnitte; Ringe: EZMW-Gitterpunkte (Endpunkte), Kreuze: Radiosondenstationen; 13r: vertikaler Querschnitt der äquivalent-potentiellen Temperatur aus Radiosondenstationen; 13s: isentrope Fläche 310 K, relative Windvektoren aus Radiosondenstationen, Systemgeschwindigkeit 290°/16 m/s, ausgezogen: Isobaren, strichliert: relative Stromlinien; 13t: wie 13s für isentrope Fläche 320 K. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3; punktierte Kurve: mittlere Position des Kommas im Satellitenbild.


13a(1)
13a(2)
13b
54
05
15
52
H300
13c


I300
13d
I500
13e
V300
13f
VA300
13g
VA500
13h
0850
13i
0700
13j
0500
13k


WABS300
13l
VAG300
13m
VAG1000
13n
VREL300
13o
hPa
13p
300
500
700
850
1000
59N/5E
47,5N/15E
13p
13p
13q

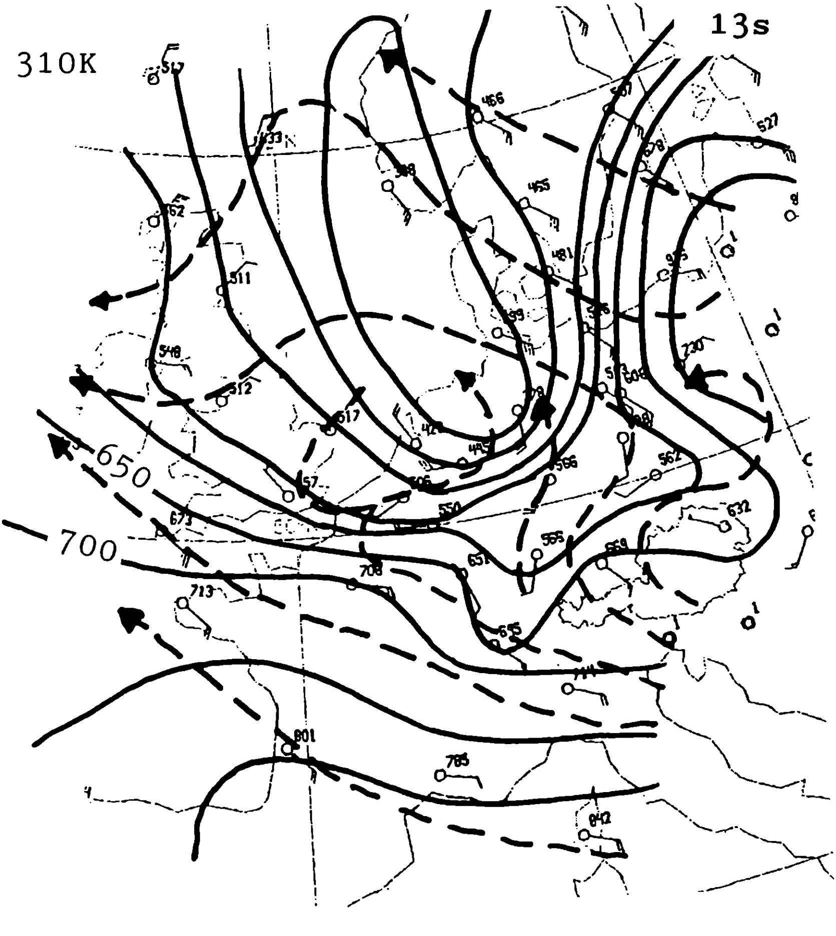


„exit region“ deutliche Querkomponenten, die im Jet- und Bodenniveau entgegengesetzt gerichtet sind. Dies ist auch in diesem Fall im Bereich des Kommas sehr gut erfüllt. Daher bestätigen auch diese Parameter, daß die physikalische Situation im Bereich der Kommakonfiguration jener einer „exit region“ entspricht.

Abbildung 13 o zeigt einen anderen Anwendungsbereich der Windfelder. Die relativen Stromlinien, die in dieser Fallstudie sehr ähnlich wie die absoluten die Jet-Achse schneiden, hängen mit der Orientierung insbesondere hoher Wolkenfasern zusammen. Auf diesen Umstand wird später noch in Kapitel 4.4. eingegangen. Vergleicht man die Faser in Abbildung 13a von ca. 50N/04E bis ca. 49N/15E mit Jet-Achse und relativen Stromlinien, so muß man eine deutliche Parallelität zwischen den letzteren und der Faser erkennen.

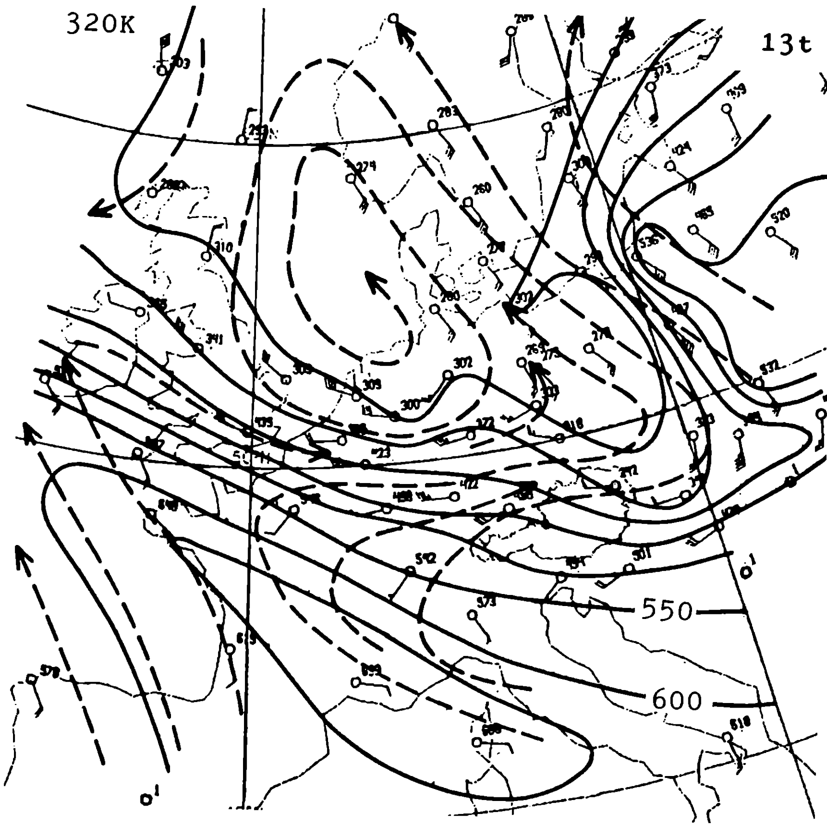
Abbildungen 13p, q sollen nun die in diesem Fall auftretenden Eigenschaften der vertikalen Querschnitte durch die „exit region“ zeigen. Modellparameter (Abbildung 13p) spiegeln in der linken „exit region“ die Modellvorstellungen gut: Konvergenz in der unteren und mittleren, Divergenz in der oberen Troposphäre sowie Aufsteigen in der mittleren Troposphäre. Der Feuchtequerschnitt zeigt hohe und hochreichende Feuchtigkeit im Bereich des Kommas und ein relatives Feuchtemaximum im Bereich der Faser.

Im Querschnitt der äquivalent-potentiellen Temperatur aus aktuellen Radiosondenmessungen (Abbildung 13r) quer durch Komma und „exit region“ werden mehrere Aussagen von Abbildung 12 bestätigt: Im



Bereich des Kommas erkennt man eine dicke Schicht mit geringen Gradienten, also die erwähnte labile Schichte, in der das in diesem Fall stark zellular aufgebaute Komma liegt; über dieser Schicht existiert eine Drängung der Isentropenflächen zwischen ca. 400 hPa in Hannover (10338) bis ca. 600 hPa in Meiningen (09548). Noch höher erkennt man eine weitere Drängungszone, die eine Neigung von ca. 300 bis 500 hPa aufweist; dort ist die hohe Faser zu finden. Die Flächen 310K und 320K repräsentieren diese beiden Zonen und haben im betrachteten Bereich einen eindeutigen Verlauf, so daß Aussagen über Vertikalbewegungen dort gesichert erscheinen.

Abbildungen 13s, t geben die Isobaren und relativen Stromlinien auf diesen beiden Flächen wieder. Auf der tieferen Fläche (Abbildung 13s) erkennt man die zyklonale Zirkulation im Bereich des Kommas und zwei Zonen mit starken Gradienten: eine von ca. 58N/19E bis 50N/10E, diese



ist mit einer dort befindlichen Front verbunden und wird hier nicht behandelt, und eine zweite von ca. 53N/03E bis 52N/11E, die mit dem Komma verbunden ist. Die relativen Stromlinien steigen im Bereich des Kommas deutlich auf (östlich von ca. 08E), dort wo auch der hochreichende Teil des Kommas ist (Abbildung 13a), und sinken auf der Rückseite deutlich ab. Damit ist auch das Aufsteigen im Bereich der linken „exit region" über dem labilen Luftpolster nachgewiesen.

Auf der höheren Fläche (Abbildung 13t) sind Isobaren und relative Stromlinien im Bereich der Faser nahezu parallel zur Jet-Achse, aber die Fläche selbst ist unter ihr durch von der zyklonalen auf die antizyklonale Seite geneigt. Die Stromlinien steigen erst östlich von ca. 05E leicht an. Etwa dort beginnt die bereits erwähnte und in Abbildung 13a sichtbare Wolkenfaser. Auf solche Bedingungen wird in 4.4. noch ausführlich eingegangen werden.

Zusammenfassend kann man sagen, daß, trotz der Individualitäten des hier betrachteten Falles, für die linke „exit region" wesentliche Punkte

der Schemadarstellung in Abbildung 12 gefunden werden können. Außerdem hat die Fallstudie gezeigt, daß die Lokalisation einer „exit region“ mit verschiedenen zusätzlichen Parametern auch in Situationen, die vom optischen Gesichtspunkt her nicht eindeutig sind, möglich ist und daß Jet-Streak-Zirkulation und kurzwellige Tröge zusammenwirken; dabei darf der Einfluß des Jet-Steaks insbesondere in den Anfangsphasen der Episoden nicht unterschätzt werden.

4.2. Modifikation von Fronten

Modifikationen der Frontbewölkung entstehen, wenn sich ein Jet-Streak dem als dreidimensional betrachteten Bereich einer Front nähert und sich ihm überlagert bzw. ihn in weiterer Folge sogar überquert. Dabei muß betont werden, daß unter dem Ausdruck „Frontverstärkung“ in diesem Zusammenhang eine Verstärkung der Frontbewölkung im Satellitenbild gemeint ist, und zwar sowohl eine horizontale als auch vertikale Verstärkung gegenüber der Umgebung.

Man kann drei unterschiedliche Auswirkungen mit jeweils unterschiedlichen physikalischen Voraussetzungen erkennen:

1. Bewölkungsverstärkung mit stark zellularem Charakter auf der zyklonalen Seite, also genau in der linken „exit region“; das tritt vor allem dann auf, wenn ein großer spitzer Winkel zwischen Jet-Achse und Front (z. B. zwischen Scherungsvorticity-Nullinie in 300 hPa und TFP) besteht, und hängt mit dem dort vorhandenen PVA-Maximum und Aufsteigen zusammen.
2. Auflösung der frontalen Bewölkung auf der antizyklonalen Seite, insbesondere in der rechten „exit region“; dies ist bedingt durch absinkende trockene Stratosphärenluft.
3. Bewölkungsverstärkung mit eher faserigem und/oder schichtförmigem Charakter auf der antizyklonalen Seite, in mittleren und höheren Schichten der Troposphäre; das tritt vor allem dann auf, wenn ein sehr kleiner spitzer Winkel zwischen Jet-Achse und Front besteht und hängt mit einem aufsteigenden relativen Luftstrom, vergleichbar einem „warm conveyor belt“, zusammen.

4.2.1. Frontverstärkung in der linken „exit region“

Erreicht ein Jet-Streak mit der in seiner „exit region“ vorhandenen Zirkulationszelle einen Frontbereich, so überlagern sich das PVA- und Konvergenz-Maximum in der linken „exit region“ einerseits und die Frontzirkulation andererseits. Als Folge davon kommt es dort zu verstärkter Aufwärtsbewegung, und es bilden sich hochreichende, in die Frontbewölkung eingelagerte Cb’s mit gegenüber der Umgebung verstärkter und vermehrter Schauer- und Gewittertätigkeit. Abbildung 14a zeigt schematisch die aus mehreren Fällen verallgemeinerte Parameterverteilung im Jet-Niveau, Abbildungen 14c, d die vertikale Zirkula-

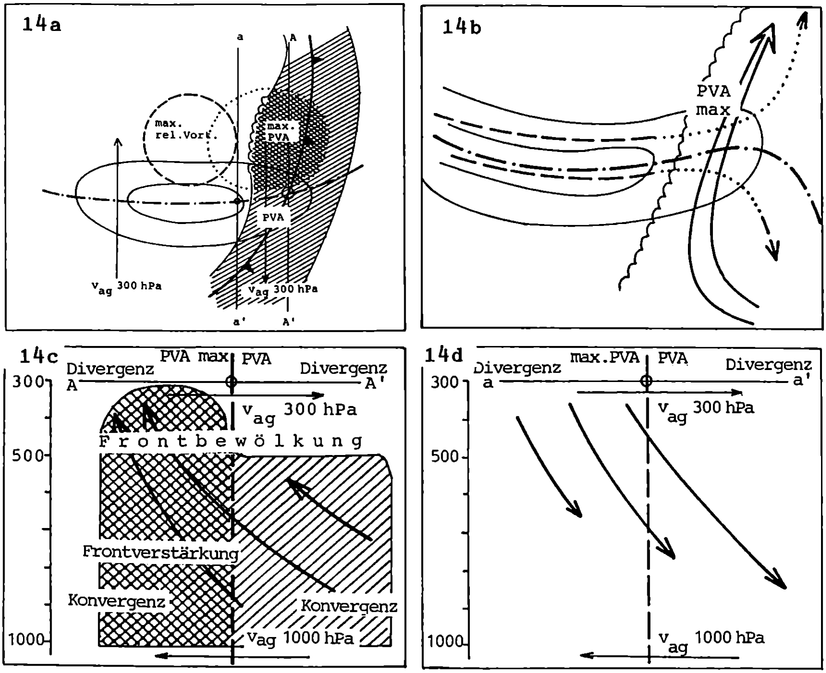


Abb. 14: Interaktion von Jet-Streak und Front: Verstärkung in der linken, Auflösung in der rechten „exit region"; Schema.
14a: Jetniveau; strichpunktiert: Jet Achse; ausgezogen: Isotachen; schraffiert: Bewölkung; v_{ag}: ageostrophische Windkomponente; AA', aa': Achsen für die vertikalen Schnitte in 14c, d. 14b: relative Ströme, dicker offener Pfeil: „warm conveyor belt", strichliert: absinkender Ast der „dry intrusion", punktiert: aufsteigender Ast der „dry intrusion", Jet-Streak und Bewölkung wie in 14a; 14c: vertikaler Querschnitt durch „exit region" längst AA': 14d: wie 14c für aa'; Erklärung siehe Text.

tionszelle in der „exit region" innerhalb des (14c) sowie hinter dem (14d) Wolkenband der Front; Abbildung 14b enthält die typische Verteilung der relativen Stromlinien auf isentropen Flächen.

Wesentliche Gedanken der Modellvorstellung treffen bei dieser satelliten-synoptischen Kategorie zu, aber es gibt auch bemerkenswerte Abweichungen. So findet man im Bereich der Bewölkungsverstärkung das in der linken „exit region" zu erwartende PVA-Maximum (Abbildung 14a), das von Konvergenz in der unteren und mittleren Troposphäre sowie Divergenz im Jet-Niveau begleitet ist (Abbildung 14a, c). Ebenso treten sehr deutlich die ageostrophischen Windkomponenten auf, die im Jet-Niveau von der zyklonalen auf die antizyklonale Seite und im bodennahen Niveau entgegengesetzt weisen. Dies gilt sowohl für die Querschnitte innerhalb der Frontbewölkung als auch für jene in der Kaltluft dahinter (Abbildungen 14a, c, d). Abweichungen von der idealisierten Jet-Streak-Zirkulation sind aber im PVA-Feld auf der

antizyklonalen Seite festzustellen (Abbildungen 14a, c). Durch den mit Kaltfronten verbundenen Höhentrog gibt es einen hohen Anteil an zyklonaler Krümmungsvorticity, der auf der antizyklonalen Seite die Scherungsvorticity naturgemäß überwiegt. Das hat PVA im gesamten Bereich der Front, also auch in der rechten „exit region", zur Folge und somit auch Konvergenz in der mittleren und Divergenz in der hohen Troposphäre. Ist der Krümmungsanteil der Vorticity sehr stark, so kann das PVA-Maximum auch sehr nahe zur Jet-Achse hin verschoben sein.

Isentrope Flächen sind im Bereich einer Kaltfront naturgemäß mehr oder weniger stark geneigt. Kombiniert man nun die Zirkulationen, wie sie z. B. im Bereich einer kräftigen Anafront und im Bereich der linken „exit region" gemäß den Modellvorstellungen stattfinden, so erkennt man deutlich, daß sich genau in der linken „exit region" das Aufsteigen aus beiden Zirkulationen überlagert. Dort ist der Bereich der „zyklonalen Frontverstärkung" im Satellitenbild zu finden.

Betrachtet man, ergänzend zum Jet-Streak-Modell, die relativen Ströme auf isentropen Flächen (Abbildung 14b), die „conveyor belts", so erkennt man für diesen Typ sehr deutlich eine von Westen kommende, etwa parallel zur Jet-Achse verlaufende und i. a. absinkende Strömung, die sich über der Front in einen nach Norden und einen nach Süden umbiegenden Ast aufspaltet. Dies ist besonders deutlich auf höheren Θ_{ek}-Flächen und ist dem aufsteigenden relativen Strom, in dessen Bereich die Frontbewölkung entsteht (dem „warm conveyor belt"), überlagert. Im Bereich der Front steigt der nach Norden umbiegende, von der zyklonalen Jet-Seite stammende relative Luftstrom wieder auf, der nach Süden umbiegende Ast aber nur bis zum Umkehrpunkt, danach sinkt er wieder ab.

Abweichende Aussagen zum Zirkulationsmodell erhält man in der „exit region" unmittelbar hinter der Frontbewölkung (Abbildung 14d); dort überwiegt das Absinken in der Kaltluft das im Rahmen der Jet-Streak-Zirkulation erwartete Aufsteigen vollkommen, so daß man, obwohl es sich noch um die linke „exit region" handelt, Absinken findet. Nur noch die quer über die Achse weisenden ageostrophischen Komponenten deuten auf eine Jet-Streak-Zirkulation hin.

Die synoptische Situation unterscheidet sich hier von der vorher besprochenen, bei der in der linken „exit region" eine EC-(Komma-) Konfiguration entsteht: Bei der Frontverstärkung ist der Jet-Streak auf der Vorderseite eines synoptischskaligen Höhentroges bereits sehr nahe an der Front, während er im EC-Fall innerhalb einer weitgehend geradlinigen Strömung liegt, der ein nur kurzwelliger Trog überlagert ist; daher ist das Gebiet der linken „exit region", das mit Aufsteigen verbunden ist, im Frontverstärkungsfall der Front überlagert, welche es bewölkungsmäßig verstärkt, während im EC-(Komma-)Fall die Bewölkung durch das Aufsteigen erst erzeugt wird.

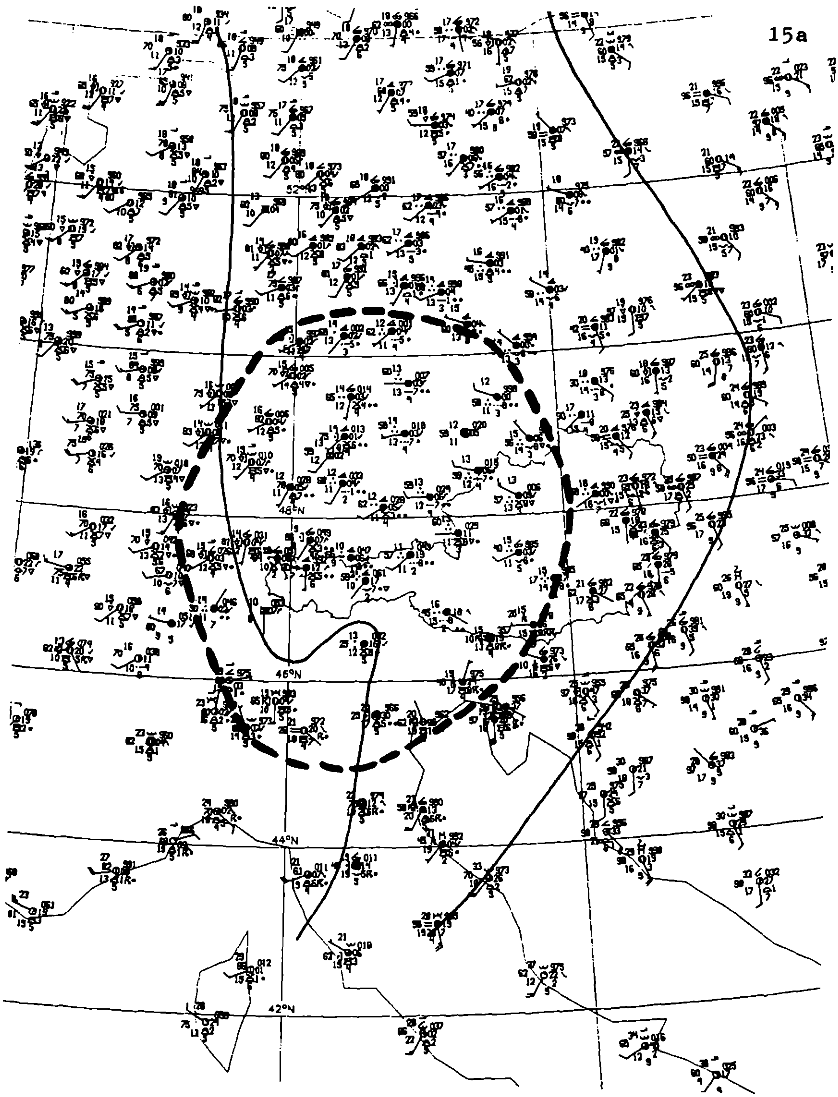
Es folgt nun eine Fallstudie für eine Frontverstärkung in der linken „exit region" In den Abbildungen 15a, b zeigen Satellitenbilder und

Synopmeldungen die Situation: Ein frontales Wolkenband erstreckt sich von Dänemark bis Mittelitalien. Im durch Punkte markierten Bereich (etwa 46–52N und 09–15E, also Oberitalien – Westösterreich – Süddeutschland) ist die Bewölkung verstärkt. Dies kann mit Hilfe der wiedergegebenen Satellitenbilder (Abbildungen 15b (1), (2)) zunächst aus der Konfiguration geschlossen werden, die eine gegenüber dem restlichen Wolkenband größere räumliche Ausdehnung bei gleichzeitig sehr hellen Graustufen erkennen läßt. Das durch Punkte eingegrenzte Gebiet wurde aber aus Falschfarbenbildern gewonnen, indem in IR- und VIS-Bild der Bereich mit den drei höchsten Graustufen eingefärbt wurde. Eine Überlagerung der Konturen dieser Gebiete ist in Abbildung 15b (3) wiedergegeben; der schraffierte Bereich repräsentiert somit jenes Gebiet innerhalb des frontalen Wolkenbandes, das die höchsten Albedowerte und gleichzeitig die kältesten Temperaturen aufweist. Wie man erkennen kann, gibt es westlich angrenzend Gebiete mit sehr kalten Wolkenobergrenzen, jedoch geringeren Albedowerten ebenso wie Gebiete vor allem im Süden mit starker Albedo, aber wärmeren Wolkenobergrenzen. Interessant ist auch das kleinräumige, linienförmige Gebiet bei etwa 48–50N und 09E; dieses repräsentiert eine Linie von Cb-Wolken und Gewittern, die auch in den Synopmeldungen (Abbildung 15a) enthalten sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in die folgenden Karten dieser Abbildung nicht das punktierte Gebiet übertragen, sondern nur sein Zentrum V.

Vom optischen Eindruck der Wolkenkonfiguration her bieten sich zwei satellitensynoptische Kategorien an: „zyklonale Frontverstärkung“ oder „klassische Welle“ Daher muß für den hier behandelten Termin zunächst geklärt werden, ob die angesprochene satelliten-synoptische Jet-Streak-Kategorie überhaupt vorliegt. Dazu werden die Feldverteilungen der absoluten Topographien 1000 und 300 hPa (Abbildungen 15c, e), der

---

Abb. 15: „Frontverstärkung in der linken „exit region“: 2. 9. 88/12 UTC.
15a: Bodenwettermeldungen; ausgezogen: Wolkenkonturen aus dem Satellitenbild, strichliert: PVA-Maximum 300 hPa; 15b: Meteosat, (1): IR, (2): VIS, (3): ausgezogen: Gebiet mit den höchsten drei Graustufen im VIS-Bild, strichliert: ebenso für das IR-Bild, schraffiert: Gebiet mit den höchsten Graustufen in IR und VIS; 15c: abs. Topographie 1000 hPa, Front: TFP; 15d: Temperaturadvektion (Advektion der Schichte) 500/1000 hPa, Front: TFP; 15e: abs. Topographie 300 hPa, Front: TFP; 15f: Isotachen 300 hPa, Front: TFP; 15g: Isotachen 500 hPa, 15h: Vorticity 300 hPa; 15i: PVA 300 hPa; 15j: PVA 500 hPa;15k: absolute Windvektoren aus EZMW-Gitterpunktsdaten 300 hPa; 15l: ageostrophische Windvektoren aus EZMW-Gitterpunktsdaten 300 hPa; 15m: wie 15l für 1000 hPa; 15n: relative Windvektoren aus EZMW-Gitterpunktsdaten 300 hPa, Systemgeschwindigkeit 260°/13 m/s; 15o: wie 15n für 500 hPa; 15p: Omega 500 hPa; 15q: Skizze für die Lage der Achsen der vertikalen Querschnitte, Kreuze: Radiosondenstationen, Punkte: EZMW-Gitterpunkte; 15r: Divergenz aus Gitterpunktswerten von EZMW, K: Konvergenz, D: Divergenz; 15s: wie 15r für Omega; 15t: wie 15r für die relative Feuchte; 15u: vertikaler Querschnitt der äquivalent-potentiellen Temperatur aus Radiosondenstationen; 15v: isentrope Fläche 315 hPa, relative Windvektoren aus Radiosondenstationen, Systemgeschwindigkeit: 260°/22 m/s, ausgezogen: Isobaren, strichliert: relative Stromlinien; 15w: wie 15v, nur mit Systemgeschwindigkeit 260°/13 m/s; 15x: wie 15w für 325 K; 15y: wie 15w für 330 K. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.


15a
46°N
44°N
42°N

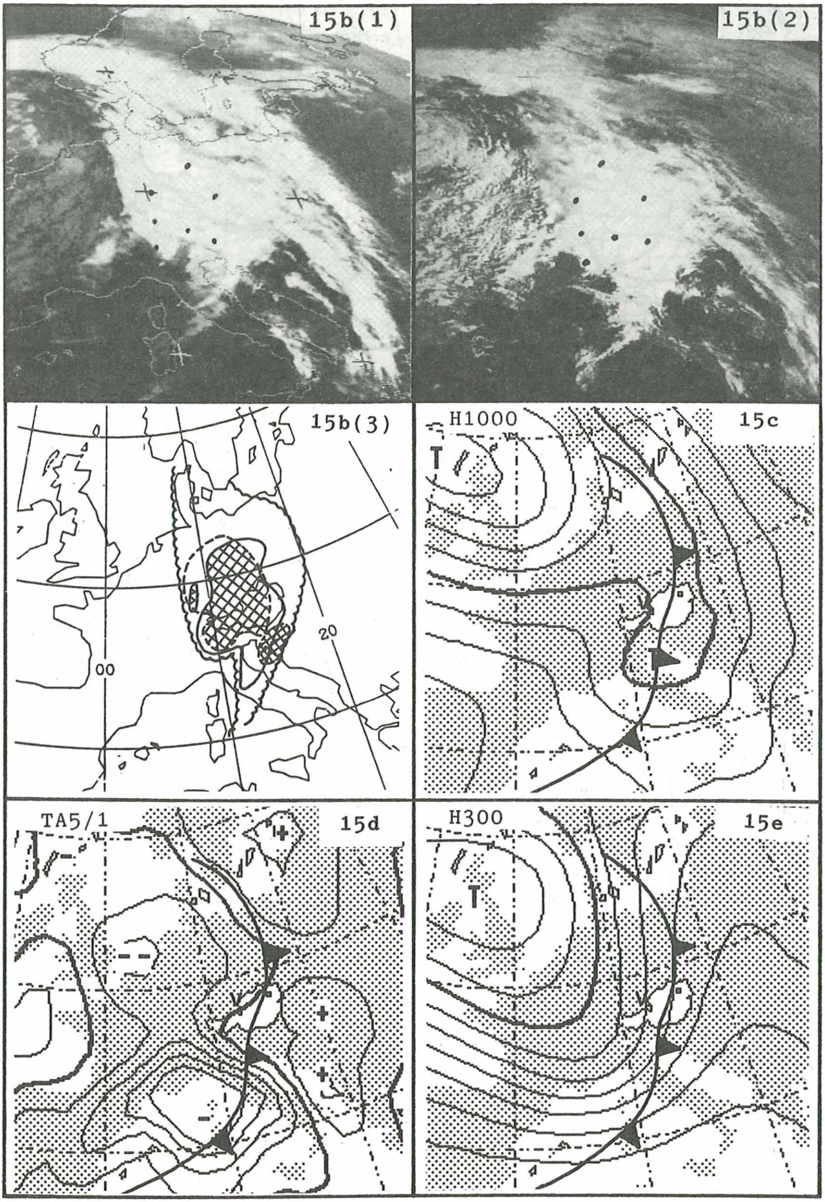
Temperaturadvektion (Advektion der Schicht 500/1000 hPa [Abbildung 15d]) und der Isotachen 300 hPa (Abbildung 15f) herangezogen.

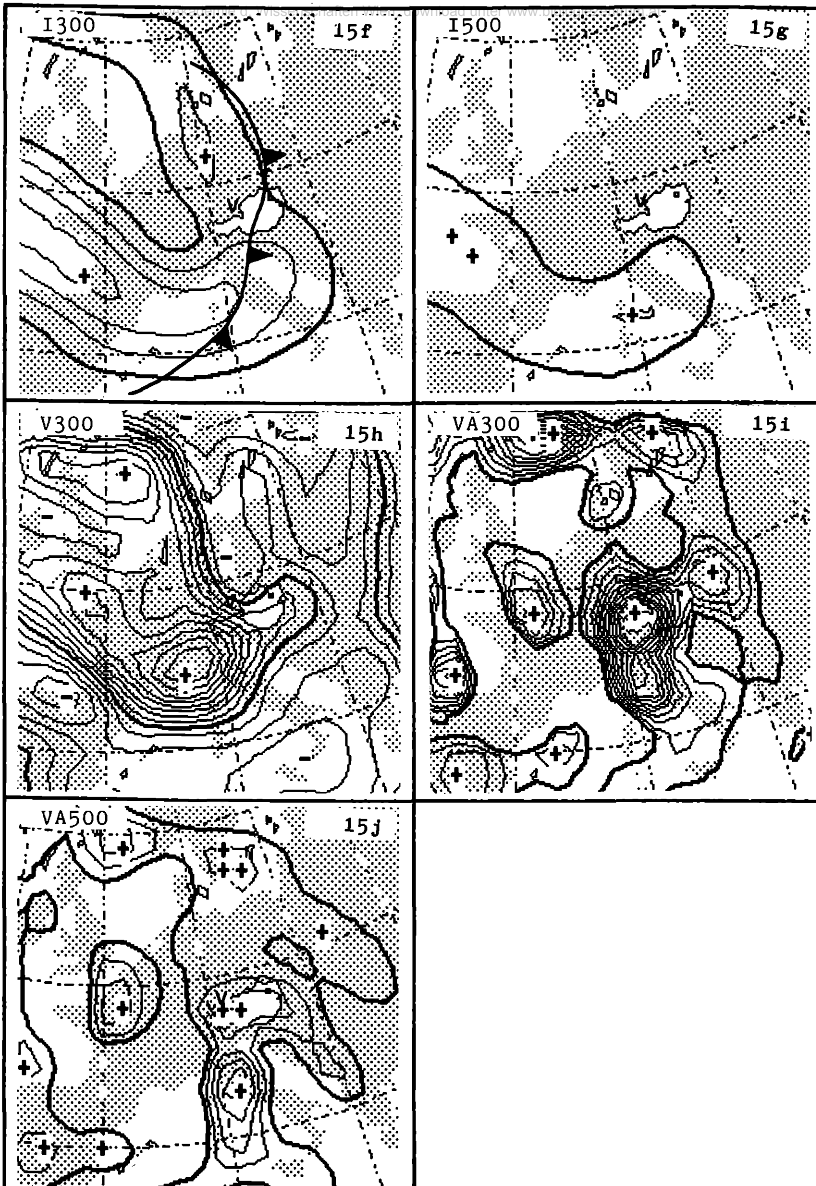
In Bodennähe erkennt man im Bereich Mittelitalien und obere Adria ein Tiefzentrum und in der Höhe darüber (bereits ab 700 hPa) einen markanten Höhentrog (Abbildung 15c, e); der TFP ist deutlich, weist aber keine ausgeprägte Wellenformation auf. Zwar ist WLA vorhanden, jedoch ist das im Bereich einer Front eine notwendige Voraussetzung, und ein WLA Maximum, das im Bereich einer Wellenentwicklung zu erwarten wäre, befindet sich nicht im zur Diskussion stehenden Bereich der verstärkten Bewölkung, sondern viel südlicher über der mittleren und südlichen Adria (Abbildung 15d). Weiters sieht man, daß ein gut entwickelter, zyklonal gekrümmter Jet-Streak die Front (den TFP) unter einem für die Ausbildung einer zyklonalen Frontverstärkung geeigneten Winkel schneidet (Abbildung 15f, g).

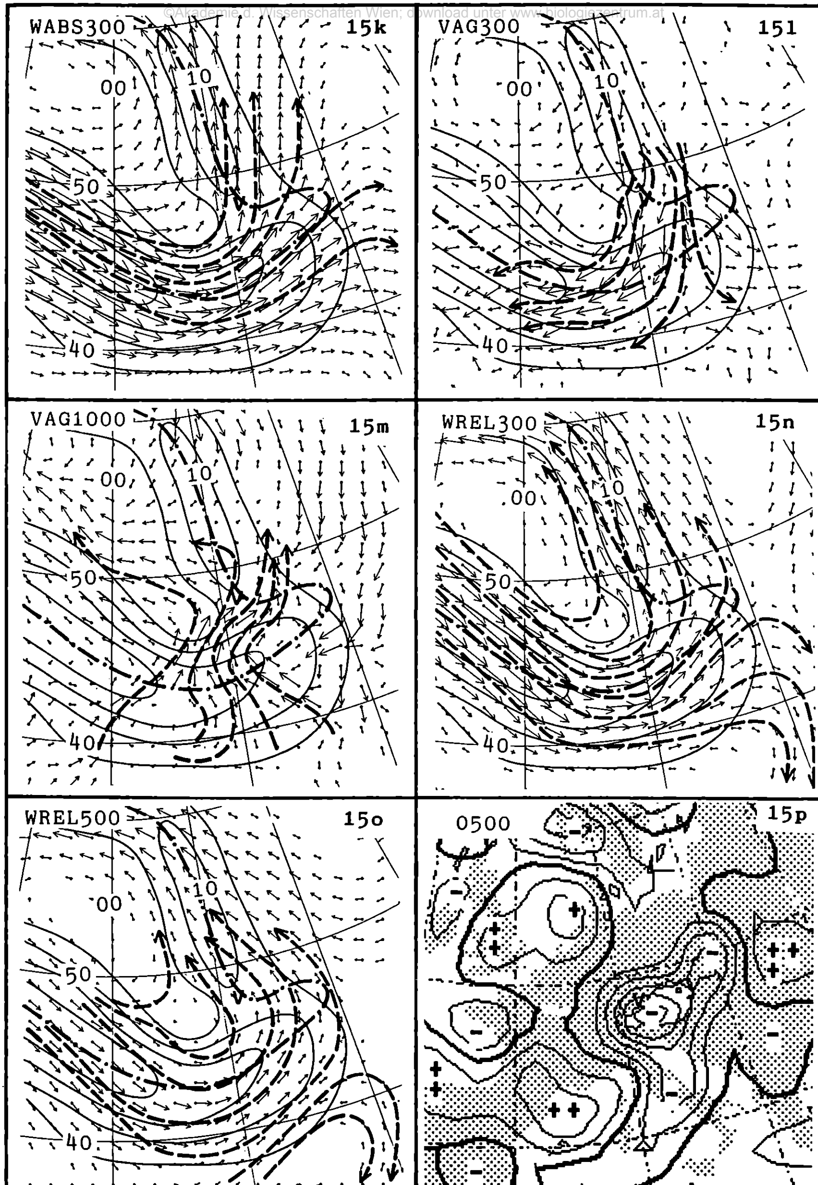
Aus alldem kann geschlossen werden, daß in diesem Beispiel die satelliten-synoptische Kategorie „zyklonale Frontverstärkung“ auftritt, daß aber durch die zyklonale Zirkulation im Mittelmeerraum zumindest in unteren Schichten eine Störung der typischen Situation zu erwarten ist. Die nachfolgenden Termine (hier nicht gezeigt) lassen auch weiterhin die ostwärts verlagerte, zyklonale Zirkulation erkennen, allerdings ohne weitere Intensivierung.

Nach diesen Überlegungen kann die eigentliche Jet-Streak-Situation näher diskutiert werden. Der bereits erwähnte Jet-Streak kreuzt mit seiner Achse die Front im Bereich Mittelitalien und ist dort auch vertikal stark entwickelt, wie die Isotachen in 500 hPa (Abbildung 15g) beweisen. Die linke „exit region“ ist vom optischen Eindruck her mit ihrem Zentrum im Bereich Westösterreich zu lokalisieren. Das wird durch die Vorticity- und PVA-Felder bestätigt (Abbildungen 15h, i): Zwar besteht das Vorticity-Maximum, entsprechend dem kräftigen Trog, etwa zur Hälfte aus Krümmungsvorticity, aber etwas südlicher, etwa im Bereich Korsika, ist der Krümmungsanteil noch wesentlich höher (bis zu 100 % und mehr). Demgemäß zeigen sich in Abbildung 15i zwei PVA-Maxima, eines bei ca. 44N/11E, das mit der Trogverlagerung zusammenhängt, und ein zweites, viel kräftigeres, über Westösterreich. Letzteres ist mit beiden Phänomenen, der Trogverlagerung und der linken „exit region“, verbunden. Vergleicht man mit der PVA-Verteilung in 500 hPa (Abbildung 15j), so ist dort die Verlagerung des Troges und/oder Vertiefung des Mittelmeertiefs das markantere Phänomen.

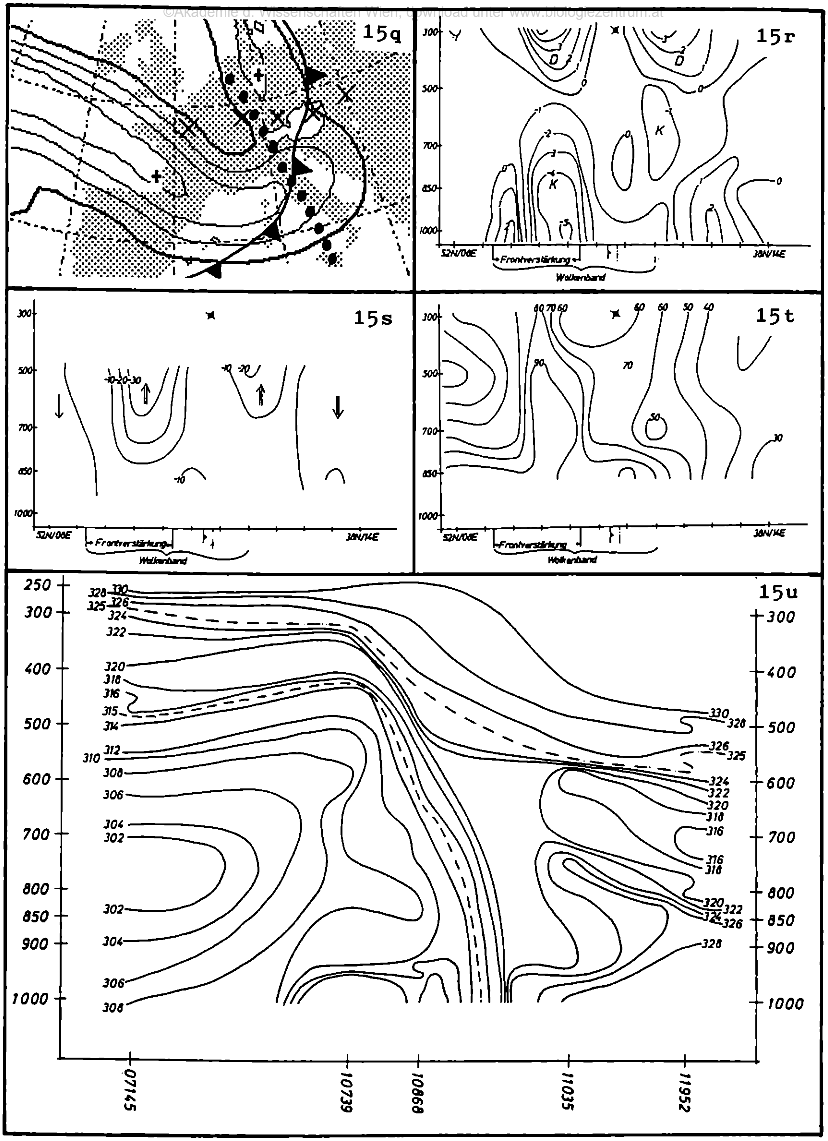
Einige Aussagen aus Abbildung 14 können als gut bestätigt betrachtet werden, insbesondere das PVA-Maximum über der Front in der linken „exit region“, aber auch das Übergreifen von PVA auf die antizyklonale Seite, das in diesem Fall durch das Tief in tieferen Schichten sehr deutlich ist. Die nächste Parametergruppe, die Windfelder an den EZMW-Gitterpunkten, bestätigen die aus den bisherigen Parametern extrahierte Position der linken „exit region“ (Abbildung 15k–n): Die ageostrophischen Windkomponenten (Abbildungen 15l, m) sind dort,


15b(1)
15b(2)
15b(3)
00
20
H1000
15c
T
TA5/1
15d
H300
15e
T


I300
15f
I500
15g
V300
15h
VA300
15i
VA500
15j



WABS300
15k
VAG300
15l
VAG1000
15m
WREL300
15n
WREL500
15o
0500
15p
00
10
50
40



entsprechend dem Modell, quer zum Jet gerichtet, und die absolute Strömung in 300 hPa (Abbildung 15k) weist eine Abnahme der Windgeschwindigkeit längs der Stromlinien im Bereich der linken „exit region“ auf.

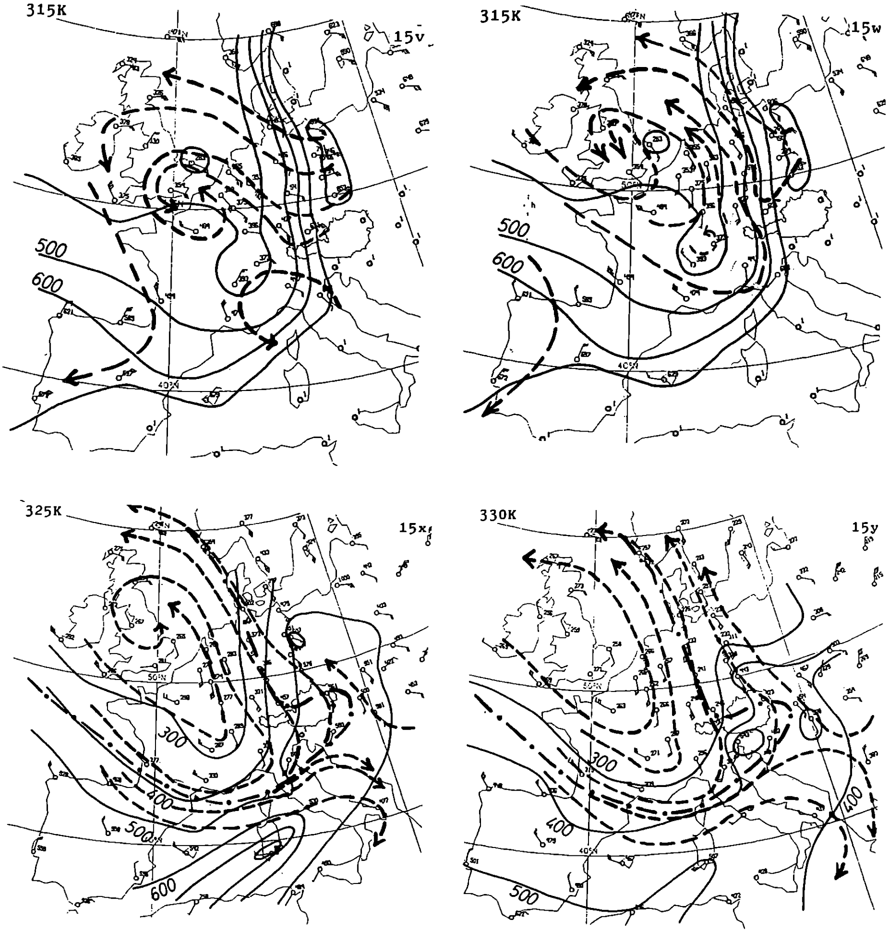
Die relativen Stromlinien in 300 und 500 hPa (Abbildung 15n, o) bestätigen das in Abbildung 14 dargestellte Aufspalten der Stromlinien in zwei Äste, von denen einer nach Süden und einer nach Norden weist. Da die Stromlinien hier auf isobaren Flächen betrachtet werden, können

Aussagen über Vertikalbewegungen nicht direkt aus dem Verlauf der Stromlinien abgelesen, sondern müssen aus den ω-Feldern von EZMW überlagert werden. Abbildung 15p gibt das ω-Feld in 500 hPa wieder. Über Südfrankreich und dem westlichen Mittelmeer unterliegt die Strömung zunächst noch Absinken, jedoch im Bereich der Aufsplittung über Mittelitalien und der mittleren Adria herrscht bereits Aufsteigen; der nach Norden umbiegende Ast der relativen Strömung gerät in den Bereich noch größeren Aufsteigens über Österreich und der ČSFR, der nach Süden umbiegende Ast gerät jedoch sehr schnell unter den Einfluß von Absinken, was im Bereich Süditalien – Sizilien gesehen werden kann.

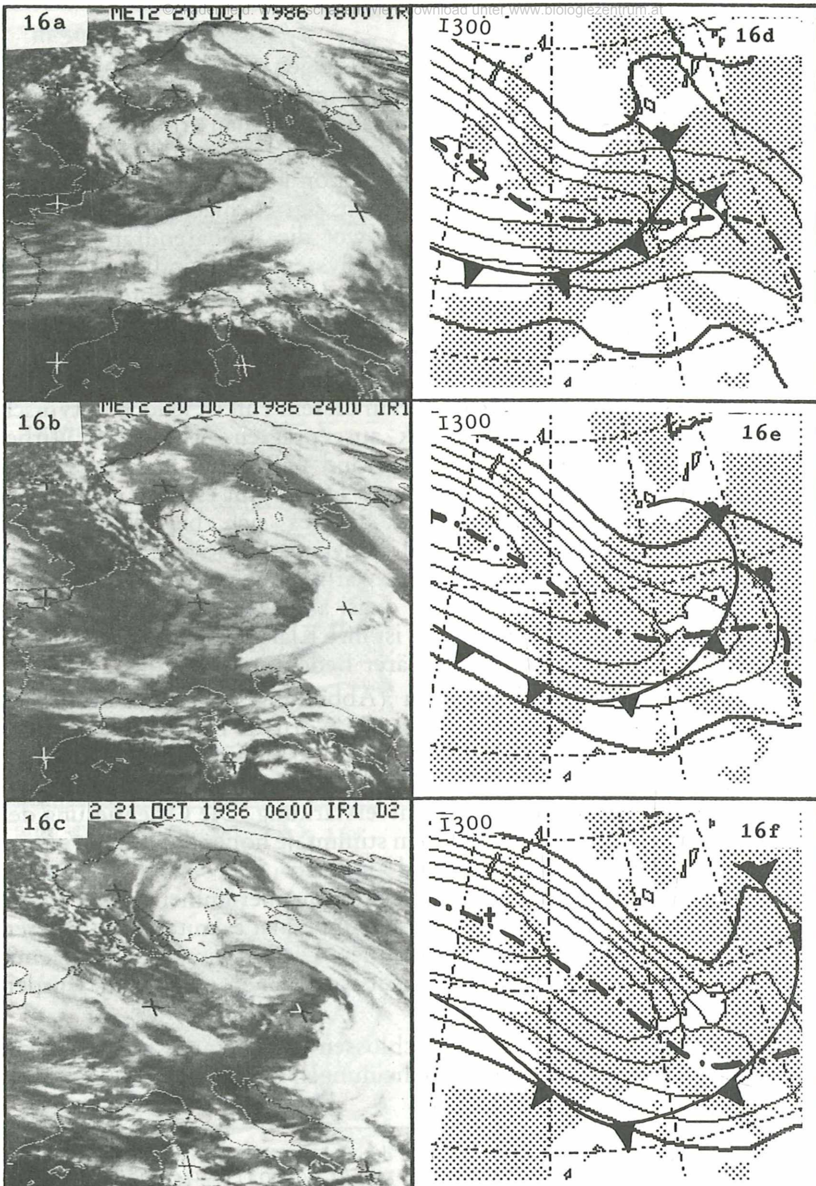
Abbildungen 15q–u zeigen vertikale Querschnitte (Abbildung 15q) durch die „exit region" aus EZMW-Gitterpunkts- und Radiosondenwerten. Man kann viele der Aussagen von Abbildung 14 wiederfinden. Zwar ist in der linken „exit region" sehr deutlich Konvergenz und Aufsteigen (Abbildungen 15r, s) in der unteren und mittleren Troposphäre sowie kräftige Divergenz in der oberen Troposphäre vorhanden, aber dasselbe stellt man in der rechten „exit region" fest, dort, wo noch Frontbewölkung ist. Somit spiegelt sich die Front in der gesamten „exit region", aber die Werte sind auf der linken Seite, im Bereich der Frontverstärkung, wesentlich intensiver. Die relative Feuchte (Abbildung 15t) zeigt dort auch hohe Werte bis in die obere Troposphäre, also stark vertikal entwickelte Bewölkung.

Die letzte Parametergruppe (Abbildung 15u–y) gibt die Auswertung auf isentropen Flächen wieder. Der vertikale Querschnitt (Abbildung 15u) verläuft nördlich der Alpen. Wie die Stationen Wien (11035) und Poprad (11952) zeigen, ist der Front im Bereich Ostösterreich – ČSFR ein gealtertes System vorgelagert, das einen Einschub sehr geringer Werte der äquivalent-potentiellen Temperatur zwischen 800 und 600 hPa aufweist und auf das die hier betrachtete Front aufläuft; daher ist die frontale Zone nicht eindeutig zu analysieren. Abbildung 15u zeigt eine mögliche und im Rahmen des Falles sinnvolle Analyse mit einer steil abstürzenden, kräftigen Drängungszone. Für den Bereich der Frontverstärkung bieten sich drei ungestörte isentrope Flächen an: 1.) 315K, eine Fläche, die innerhalb der Frontalzone liegt; 2.) 325K, eine Fläche, die im Bereich der Frontverstärkung noch eine deutliche Neigung zeigt, dort die Schichte 350 bis 600 hPa erfaßt und im östlichen Bereich des Querschnittes oberhalb der durch die andere Luftmasse gekennzeichneten Schichte liegt; 3.) 330K, eine Fläche, die etwa im Jet-Niveau liegt und erst weiter östlich bis ca. 500 hPa geneigt ist.

In diesem Fall ergeben sich Schwierigkeiten bei der Bestimmung einer für das gesamte System repräsentativen Systemgeschwindigkeit, da sich sowohl aus der Satellitenbildfolge als auch aus relevanten EZMW Daten große Unterschiede zwischen dem System im Mittelmeerraum und im Bereich über den bzw. nördlich der Alpen ergeben. Im zuletzt genannten Gebiet ist die Verlagerung wesentlich langsamer als südlich davon, nämlich fast nur halb so groß: 260 Grad und 13 m/sec gegenüber



260 Grad und 22 m/sec. Daher muß zunächst überlegt werden, welche Phänomene mit welcher Systemgeschwindigkeit erfaßt werden bzw. welche hier von Interesse sind. Vergleiche haben gezeigt, daß die wesentlichen Aussagen bei beiden Relativgeschwindigkeiten hervortreten, daß aber die Tiefdruckzirkulation im Mittelmeerraum mit der schnelleren Systemgeschwindigkeit deutlicher erfaßt wird, die Orientierung des Wolkenrandes der Front nördlich der Alpen, also auch im Bereich der Frontverstärkung, jedoch mit der langsameren. Demzufolge sind in Abbildung 15v–y für die unterste Fläche (315K) die Ergebnisse beider Systemgeschwindigkeiten gegenübergestellt, in den beiden oberen jedoch nur noch die Karten mit der langsameren Systemgeschwindigkeit wiedergegeben. Letztere liegt auch den relativen Stromlinien auf isobaren Flächen (Abbildung 15n, o) zugrunde.


16a
MET2 20 OCT 1986 1800 IR
I300
16d
16b
MET2 20 OCT 1986 2400 IR1
I300
16e
16c
2 21 OCT 1986 0600 IR1 D2
I300
16f

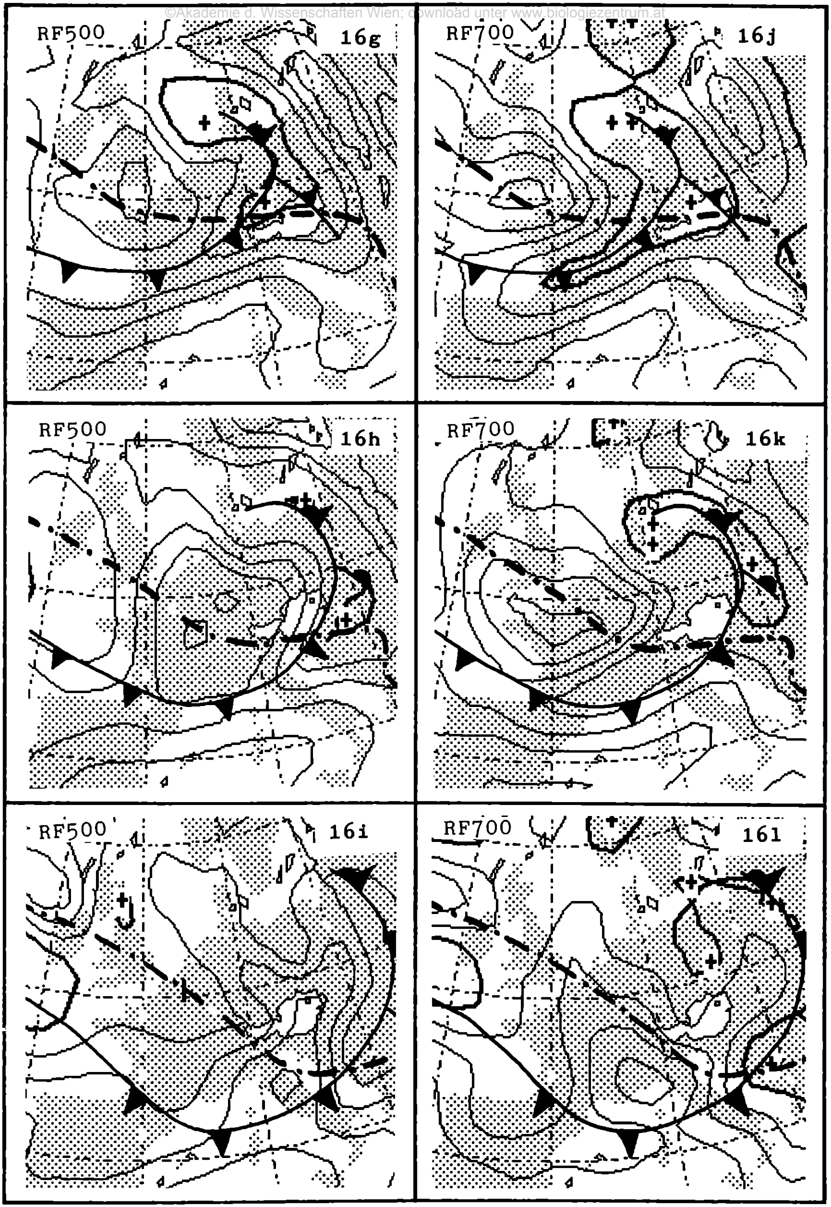
Die drei Flächen (Abbildung 15v–y) zeigen sowohl die typischen, in der Schemazeichnung von Abbildung 14 angeführten Merkmale, als auch die Besonderheiten dieses Falles. Zunächst muß man erkennen, daß die typische frontale „conveyor belt"-Verteilung durch die im Bereich Westalpen vorhandene zyklonale Zirkulation gestört ist. Sieht man von diesem Bereich ab, so können folgende Aussagen gemacht werden: In der 315K Fläche (Abbildung 15v, w), wo die Isobarendrängung am markantesten ist, erkennt man bei beiden Systemgeschwindigkeiten einen von Osten kommenden relativen Strom, der bis zum Gipfelpunkt der frontalen Drängungszone stark aufsteigt, westlich davon wesentlich schwächer. Dies ist auch die Westgrenze der Bewölkung. Dieser relative Strom sollte gemäß dem Schema in Abbildung 14 dem „warm conveyor belt" entsprechen. Die Konfiguration in diesem Fall ist jedoch untypisch und kommt durch die zwei stark ausgeprägten zyklonalen Wirbel zustande, einer im Bereich Südostengland – Benelux und der bereits mehrmals erwähnte im Mittelmeerraum. Daher gibt es noch eine zweite Interpretationsmöglichkeit, nämlich daß es sich bei dieser, stark okkludierten Front um den „cold conveyor belt" handelt, der die Wolkenspirale sehr gut spiegelt. Der „warm conveyor belt" wird durch die Zirkulation im Mittelmeerraum quasi abgelenkt. Obwohl dies eine äußerst interessante Problematik ist, ist ihre Klärung für die Tatsache der Bewölkungsbildung nicht von primärer Bedeutung.

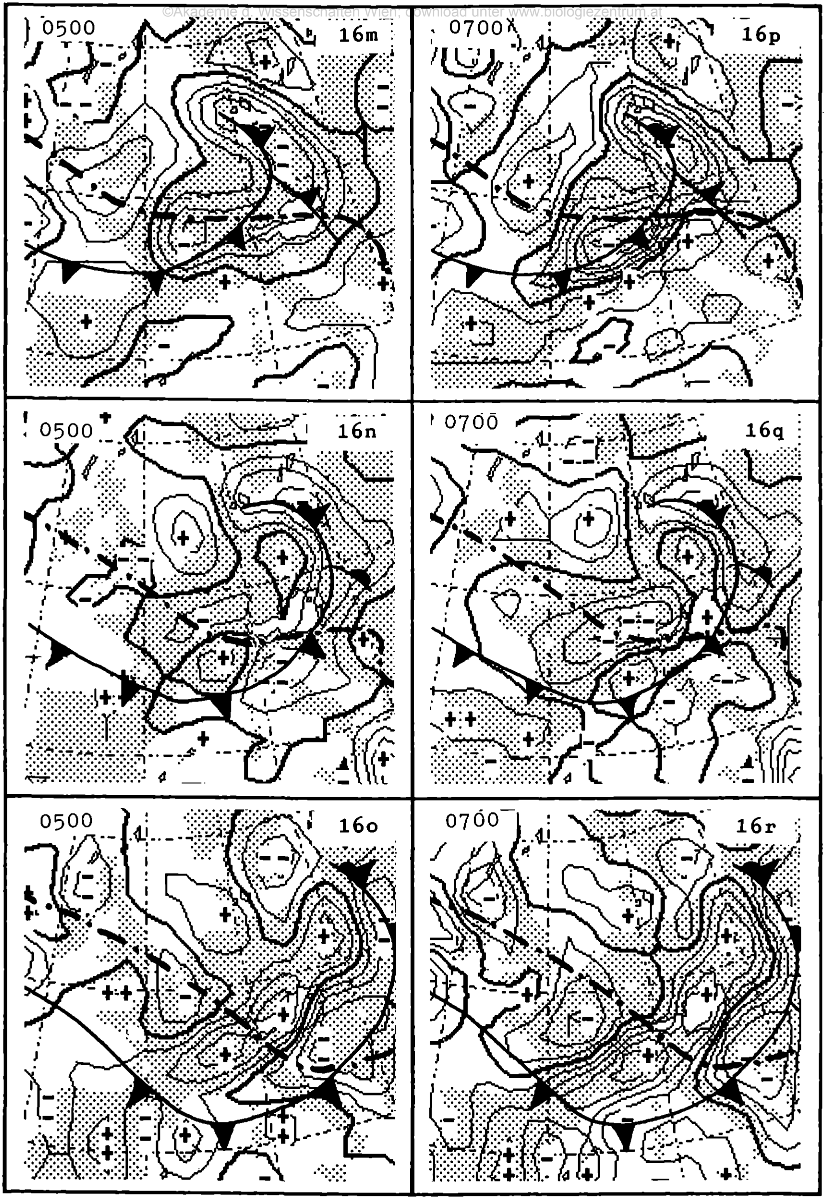
Die darüberliegenden Flächen (Abbildung 15x, y) zeigen eine Strömung auf der zyklonalen Jetseite von Cornwal bis Korsika, die sich im Bereich der „exit region" in zwei Äste aufspaltet. Der nach Nordwesten umbiegende Ast steigt im Frontbereich wieder auf und zwar besonders stark im Bereich der Frontverstärkung. Die Orientierung der relativen Stromlinien in diesen Höhen stimmt, je höher die Fläche, immer besser mit dem Wolkenbandrand überein. Der nach Südwesten umbiegende Ast sinkt zunächst schwach, dann aber immer stärker ab; da dieses Phänomen südlich der Alpen stattfindet, ist es mit der schnelleren Systemgeschwindigkeit besser zu erkennen. Diese Aussagen stimmen mit jenen, die aus EZMW Karten für isobare Flächen gewonnen wurden (Abbildung 15k–p), genau überein.

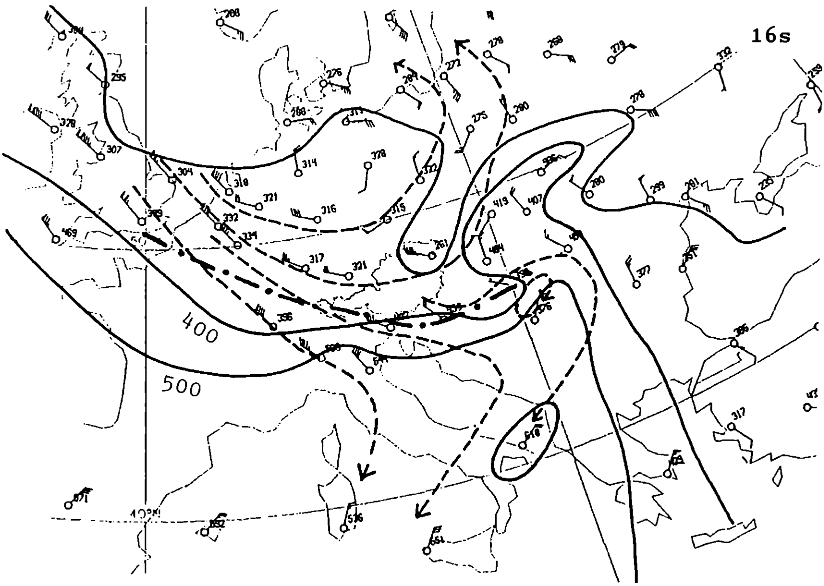
Bevor diese Fallstudie abgeschlossen wird, muß noch auf die behaupteten verstärkten Wettererscheinungen im Bereich der Frontver-

---

Abb. 16: Auflösung der Frontbewölkung in der rechten „exit region": 20.–21. 10. 86. 16a, b, c: IR, Meteosat; 16a: 20. 10./18 UTC, 16b: 21. 10./00 UTC, 16c: 20. 10./06 UTC; 16d, e, f.: ausgezogen: Isotachen 300 hPa, strichpunktiert: Jet-Achse, Front: TFP; 16d: 20. 10./18 UTC, 16e: 21. 10./00 UTC, 16f: 21. 10./06 UTC; 16g, h, i: Rel. Feuchte 500; 16g: 20. 10./18 UTC, 16h: 21. 10./00 UTC, 16i: 21. 10./06 UTC; 16j, k, l: Rel. Feuchte 700 hPa; 16j: 20. 10./18 UTC, 16k: 21. 10./00 UTC, 16l: 21. 10./06 UTC; 16m, n, o: Omega 500 hPa; 16m: 20. 10./18 UTC, 16n: 21. 10./00 UTC,, 16o: 21. 10./06 UTC; 16p, q,r: Omega 700, 16p: 20. 10./18 UTC, 16q: 21. 10./00 UTC, 16r: 21. 10./06 UTC; 16s: isentrope Fläche 320 K, relative Windvektoren aus Radiosondenstationen, Systemgeschwindigkeit 260°/20 m/s, ausgezogen: Isobaren, strichliert: rel. Stromlinien. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.


RF500
16g
RF700
16j
RF500
16h
RF700
16k
RF500
16i
RF700
16l


0500
16m
0700
16p
0500
16n
0700
16q
0500
16o
0700
16r



stärkung eingegangen werden. Wie am Anfang beschrieben, existieren im Satellitenbild dort sowohl die höchsten Albedowerte als auch die kältesten Wolkenoberflächen. An dieser Stelle sollen nun auch die Synopmeldungen näher untersucht werden. In Abbildung 15a sind sowohl die Konturen des frontalen Bewölkungsbandes als auch das relevante PVA Maximum eingetragen. Vergleicht man für das frontale Wolkenband die Wettermeldungen innerhalb und außerhalb des PVA Maximums, so kann man folgende Aussagen ableiten: Innerhalb des PVA Maximums waren 39, außerhalb 57 Stationsmeldungen vorhanden; innerhalb des PVA Maximums wiesen 21 % der Stationen Bewölkung ohne Niederschläge jeglicher Art auf, außerhalb waren dies 61 % der Stationen; innerhalb des PVA Maximums wiesen 21 % der Stationen konvektive Wettererscheinungen auf (Cb, Schauer, Gewitter), außerhalb 11 %; bei den Niederschlagsintensitäten wird innerhalb des PVA Maximums am häufigsten die stärkere Intensität gemeldet (38 % bei ww = 63), außerhalb eine geringere Intensität (19 % bei ww = 61). Diese Zahlen sind wohl geeignet, die behauptete größere Wetteraktivität im Bereich der „Frontverstärkung“ zu untermauern.

4.2.2. Auflösung der Frontbewölkung auf der antizyklonalen Seite

Schon mehrmals sind die von der zyklonalen Jet-Seite kommenden unter der Jet-Achse hindurch auf die antizyklonale Seite absinkenden relativen Luftströme erwähnt worden. Dies kann man am besten auf isentropen Flächen zeigen, das Absinken macht sich aber auch auf isobaren Flächen bemerkbar. Im Zuge dieses Vorganges stellt man sehr

trockene Luft fest, die aus Höhen etwa im Jet-Niveau kommend bis in die mittlere Troposphäre und darunter absinkt. Befindet sich dort Frontbewölkung, was bei etwas spitzeren Winkeln zwischen Front und Jet-Achse der Fall ist, so wird sie plötzlich und vollständig aufgelöst.

Abbildung 16 zeigt dies anhand der Fallstudie vom 20. 10. 1986, 18 UTC – 21. 10. 1986, 06 UTC. Eine gut ausgebildete Front hat vom Bereich des Golfes von Biskaya bis Frankreich eher zonale Orientierung. Während des betrachteten Zeitraumes verlagert sie sich in den Mittelmeerraum. Ein markanter ausgedehnter Jet-Streak überquert die Front, wobei TFP und Jet-Achse über weite Strecken ungefähr parallel sind.

Wie die Satellitenbilder zeigen (Abbildung 16a–c), findet zwischen 18 und 24 UTC eine deutliche Verminderung der bandförmigen, frontalen Bewölkung im Bereich Frankreich – Oberitalien statt, die während der nächsten 6 Stunden im Bereich Oberitalien – Adria weitergeführt wird. Wie Abbildung 16d–f zeigt, handelt es sich dabei um Bewölkung zwischen Jet-Achse und TFP.

Während um 18 UTC die trockenste Luft sowohl in 700 als auch in 500 hPa (Abbildung 16g, j) über der Jet-Achse bzw. zyklonal davon liegt, erkennt man bis zum nächsten Termin (Abbildung 16 h, k) eine deutliche Verlagerung der trockenen Luft von der zyklonalen auf die antizyklonale Seite. In beiden Niveaus, besonders stark aber in 500 hPa, ergibt sich somit eine kräftige Abtrocknung über dem frontalen Wolkenband, die wohl mit der Auflösung der Bewölkung in Zusammenhang steht. In 500 hPa ist der Unterschied der relativen Feuchte zwischen 18 und 00 UTC am größten (Abbildung 16g, h), in 700 hPa jedoch zwischen 00 und 06 UTC (Abbildung 16k, l). Im Bereich nördliche Adria und Oberitalien werden Werte festgestellt, die rein advektiv nicht erklärbar sind; nur das Absinken einer trockenen Strömung kann sie plausibel machen.

Dieses Absinken kann sowohl auf isentropen als auch auf geeigneten isobaren Flächen sehr deutlich gesehen werden. In 500 hPa z. B. entsteht zwischen 18 und 00 UTC (Abbildung 16m, n) über Südfrankreich ein Gebiet mit Absinken zwischen Jet-Achse und TFP genau dort, wo die größte Abnahme der Feuchte stattgefunden hat. Analoges gilt für 700 hPa zwischen 00 und 06 UTC (Abbildung 16q, r) im Bereich Südfrankreich und Oberitalien.

Sehr deutlich zeigt für 00 UTC die isentrope Karte von 320K (Abbildung 16s) einen relativen Strom aus Nordwest, der die Jet-Achse kreuzt und am stärksten im Bereich Südfrankreich und Oberitalien absinkt.

4.2.3. Frontverstärkung auf der antizyklonalen Seite

Der hier interessierende Bereich befindet sich auf der antizyklonalen Seite der Jet-Achse, aber etwa von der Mitte des Jet-Streaks aus in die „exit region“ reichend. Solch ein Typ tritt häufig dann auf, wenn ein Jet-Streak

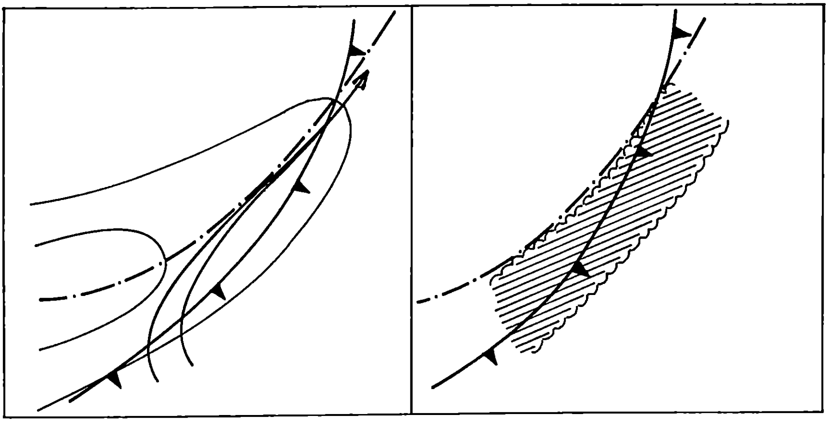


Abb. 17: Frontverstärkung auf der antizyklonalen Seite; Schema.
Ausgezogen: Isotachen 300 hPa; strichpunktiert: Jet Achse; schraffiert: Bewölkung; offener Pfeil: aufsteigender relativer Luftstrom.

etwa parallel zu einer Front liegt und sich ihr dabei annähert. Dann überlagern sich in der „exit region" das Gebiet mit Konvergenz in hohen Niveaus und die barokline Zone der Front. Abbildung 17 zeigt dies schematisch; die dabei beobachtete charakteristische Verteilung der relativen Ströme auf isentropen Flächen gibt einen aufsteigenden relativen Strom wieder.

Dies ist eine ganz andere Situation als im Falle der zyklonalen Frontverstärkung: Bei letzterer war das Aufsteigen innerhalb der Querzirkulation in der „exit region" wesentlich, während bei diesem Typus das Aufsteigen innerhalb eines relativen Luftstromes auf der antizyklonalen Seite eher parallel zur Jet-Achse erfolgt.

Ganz anders ist die Situation aber auch verglichen mit der in 4.2.2. behandelten: Während dort die Bewölkung auf der antizyklonalen Seite aufgelöst wird, wird sie hier verstärkt bzw. erzeugt. Bedeutet dies, daß die Erklärung einer der beiden Situationen falsch ist oder treten beide Möglichkeiten auf? Ob eine Wolkenauflösung überhaupt stattfindet, wird sicher von der Intensität und dem Absinken der trockenen Strömung abhängen; prinzipiell sind aber beide Effekte gleichzeitig möglich und denkbar, nämlich die Auflösung der Bewölkung in der unteren und mittleren und/oder die Bildung von Bewölkung innerhalb eines aufsteigenden relativen Luftstromes in der mittleren und oberen Troposphäre.

Abbildung 18 gibt ein Beispiel für eine Frontverstärkung auf der antizyklonalen Seite wieder. Abbildung 18a, b zeigt eine markante Verstärkung der um 18 UTC noch faserigen Bewölkung im Bereich 47N/15E – 49N/24E (F). Die Skizzen auf der rechten Seite sind aus Falschfarbenfotos übertragen und geben im relevanten geographischen

Bereich die Gebiete mit den Graustufenintervallen 10—14 wieder. Um 18 UTC sind nur schmale Streifen mit Stufe 12 vorhanden, die Stufe 10 bildet ein zusammenhängendes Gebiet. Die Bewölkungsbildung bzw. -verstärkung bis 00 UTC ist besonders deutlich bei den Stufen 11 und 12 zu beobachten.

Diese Fallstudie bildet das Ende einer längeren Jet-Streak-Episode, die ein Komma in der linken „exit region" zeigt und in den Abbildungen 9 und 13 schon behandelt wurde. Das dort ausführlich beschriebene Komma erkennt man in Abbildung 18a, b noch deutlich bei K. Die Verlagerung des Jet-Streak von 18 bis 24 UTC führt zu seiner Annäherung an eine in Südösterreich und Nordjugoslawien liegende Luftmassengrenze (Abbildung 18c).

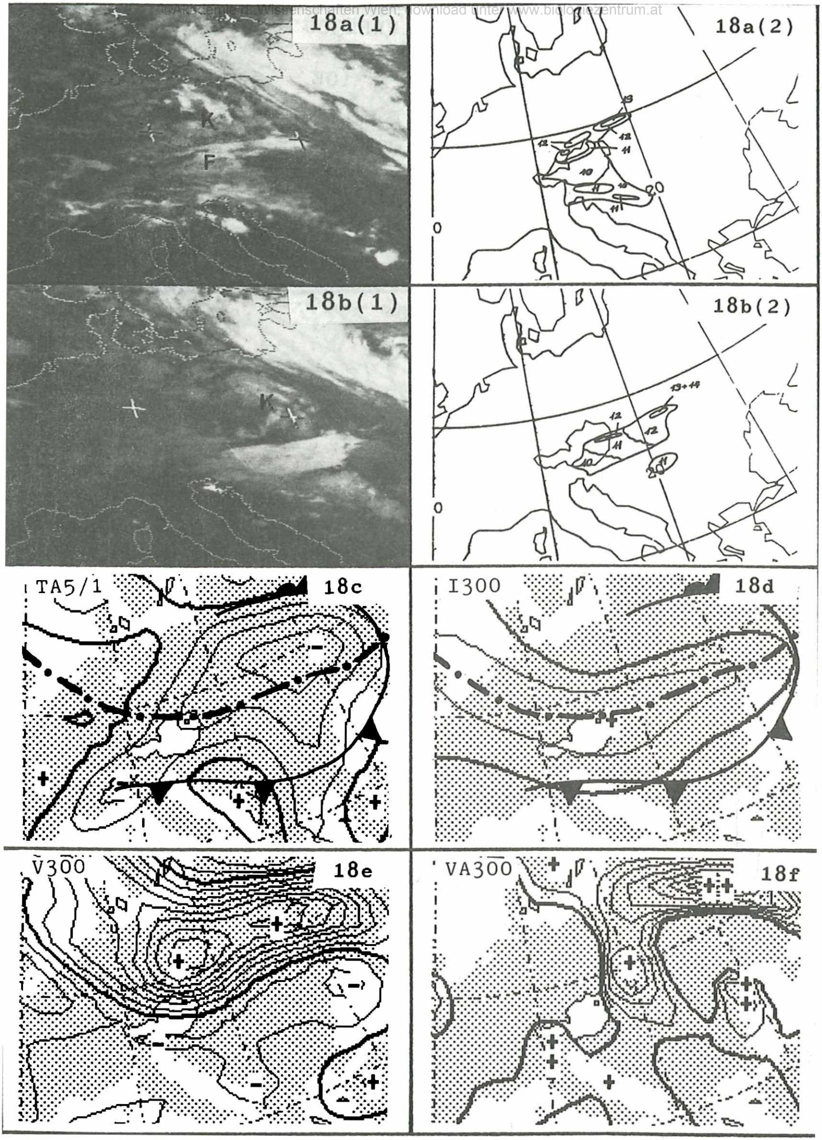
Abbildung 18d—f zeigt die Lage des Jet-Streak, das Vorticitymaximum das zu 2/3 aus Scherungsvorticity besteht und das PVA Maximum, das in der linken „exit region" lokalisiert ist, aber entsprechend den in 4.1. erwähnten Abweichungen vom Idealmodell auch über die Jet-Achse reicht. Wie aufgrund von Abbildung 17 zu erwarten war, haben die letzten zwei Felder keinen deutlichen optischen Zusammenhang zur hier unter Diskussion stehenden Bewölkungsverstärkung. Daher wurde auch auf die Wiedergabe ihrer vertikalen Querschnitte verzichtet.

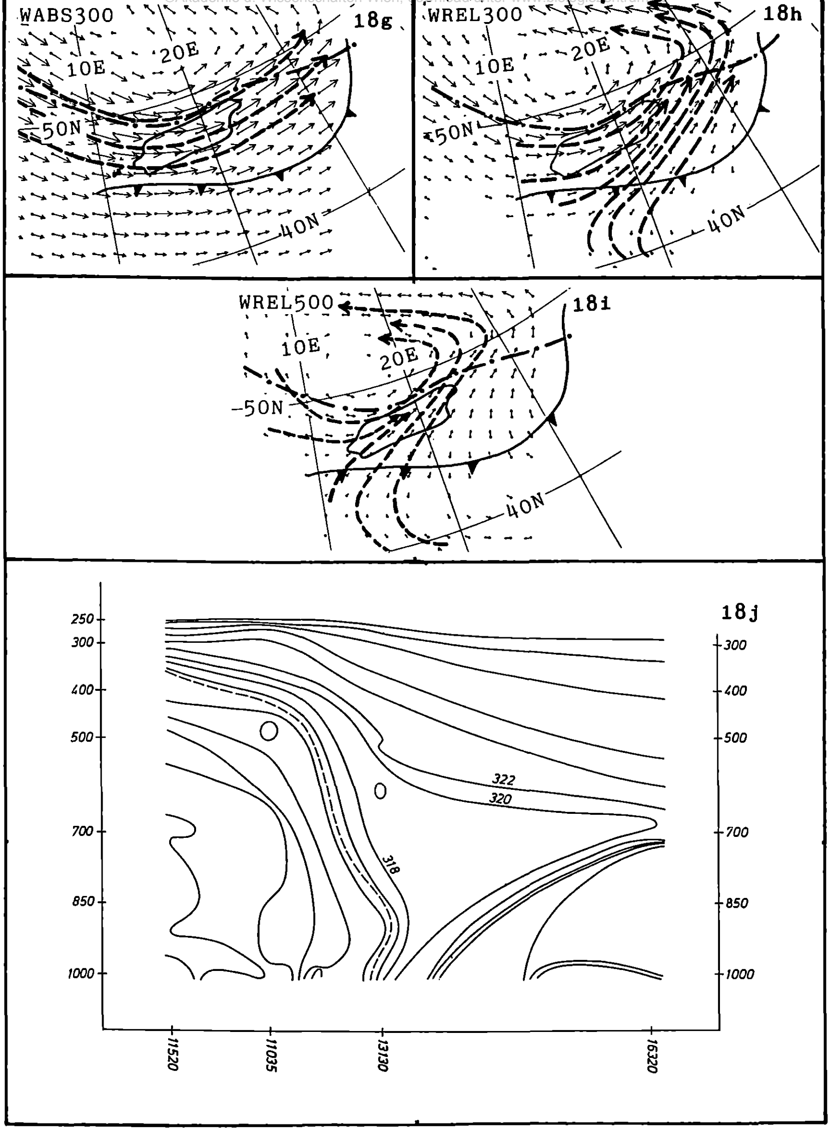
Ganz anders sieht das aber bei Betrachtung der relativen Stromlinien aus (Abbildung 18g—i). Abbildung 18g, h stellt zunächst absolute und relative Strömung in 300 hPa gegenüber. Der Unterschied der beiden Felder ist markant: Während die absolute Strömung im Bereich der betrachteten Bewölkung eine rein westliche Richtung zeigt, enthüllen die relativen Stromlinien eine typische frontale „conveyor belt"-Situation. Allerdings muß für dieses Niveau vermerkt werden, daß der „warm conveyor belt" im Vergleich zur Bewölkung zu weit im Südosten liegt und die Bewölkungsverstärkung daher in den Bereich einer weit über die Achse reichenden „dry intrusion" zu finden wäre. Ganz anders ist das in 500 hPa (Abbildung 18i). Dort stimmen „warm conveyor belt" und Bewölkungsverstärkung sehr gut überein, und der Bereich, in dem die beiden unterschiedlichen Ströme konvergieren, liegt nahe beim Nordrand der Bewölkung. Da es sich um isobare Flächen handelt, dürfen diese Karten aber richtigerweise nur als Hinweis für das Auftreten der

---

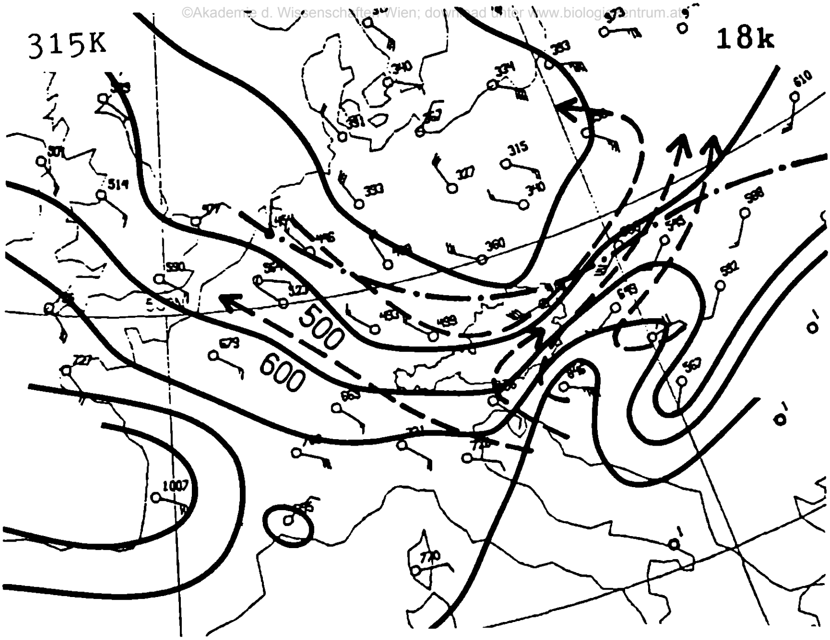
Abb. 18: Frontverstärkung auf der antizyklonalen Seite: 20.—21. 8. 86; Parameter: 21. 8./00 UTC.

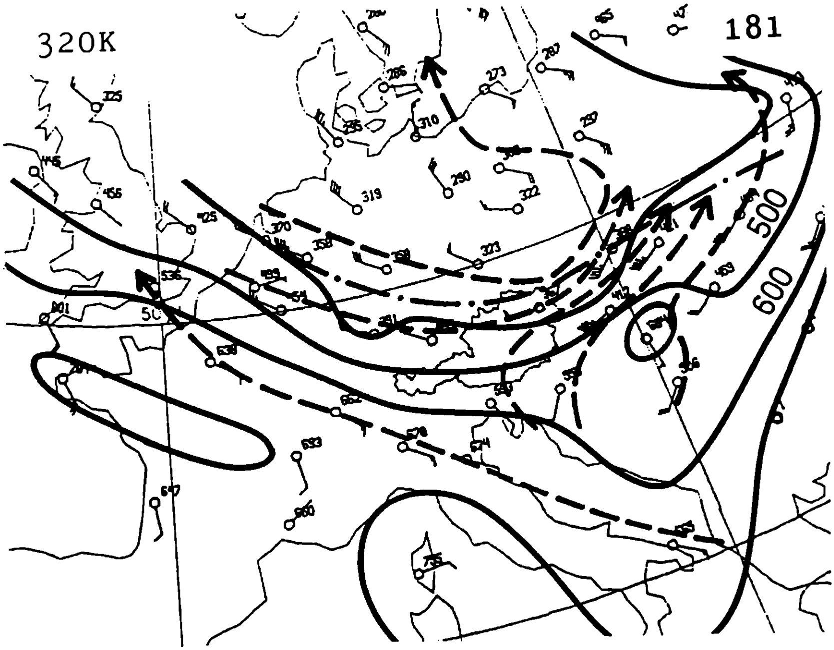
18a: 20. 8./18 UTC, (1): IR, Meteosat, (2): Graustufen aus dem Falschfarbenbild; 18b: 21. 8./00 UTC„ (1): IR, Meteosat, (2): Graustufen aus dem Falschfarbenbild; 18c: Temperaturadvektion 500/1000 hPa, strichpunktiert: Nullinie Scherungsvorticity 300 hPa, Frontsymbol: TFP; 18d: Isotachen 300 hPa, sonst wie 18c; 18e: Vorticity 300 hPa; 18f: Vorticityadvektion 300 hPa; 18g: Windvektoren 300 hPa; 18h: rel. Windvektoren 300 hPa, Systemgeschwindigkeit: 290°/16 m/s; 18i: wie 18h für 500 hPa; 18j: vertikaler Querschnitt der äquivalent-potentiellen Temperatur aus Radiosondenstationen; 18k: isentrope Fläche 315 K, rel. Windvektoren aus Radiosondenstationen, ausgezogen: Isobaren, strichliert: rel. Stromlinien, Systemgeschwindigkeit: 290°/16 m/s; 18l: wie 18k, nur für 320 K. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.


18a(1)
K
F
18a(2)
18b(1)
K
18b(2)
13+14
TA5/1
18c
I300
18d
V300
18e
VA300
18f



WABS300
18g
10E
20E
50N
40N
WREL300
18h
10E
20E
50N
40N
WREL500
18i
10E
20E
50N
40N
18j
250
300
400
500
700
850
1000
322
320
318
11520
11035
13130
16320


315K
18k
500
600


320K
181
500
600

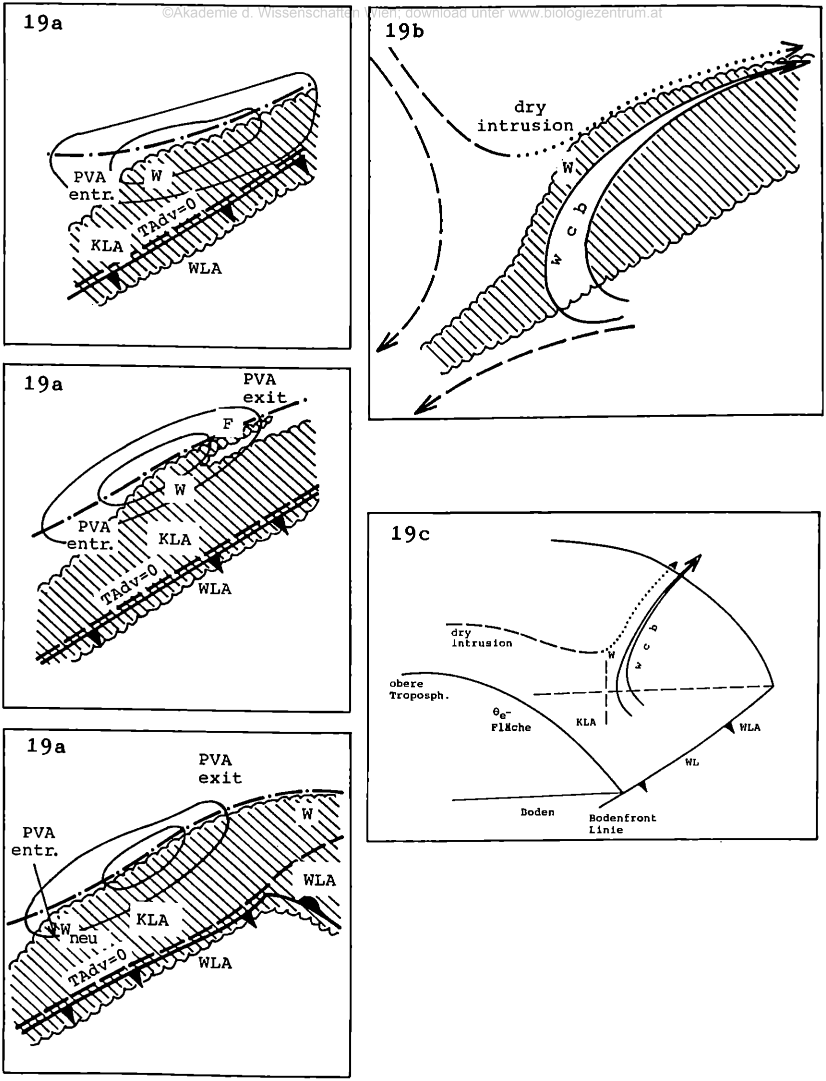


Abb. 19: Jet-Streak-Welle; Schema.
19a: typischer Lebenszyklus; ausgezogen: Isotachen, strichpunktiert: Jet-Achse, strichliert: Nullinie der Temperaturadvektion, schraffiert: Bewölkung; 19b: typische Verteilung der relativen Ströme: dicker offener Pfeil: aufsteigender „warm conveyor belt“, strichliert (punktiert): absinkender (aufsteigender) relativer Strom; schraffiert: Bewölkung; 19c: perspektivische Darstellung einer relevanten isentropen Fläche, Symbole wie bei 19b.

„conveyor belts“ ohne Aussage über ihre Vertikalbewegungen, herangezogen werden; eine Aufgabe, die sie nicht nur in diesem Beispiel ausgezeichnet erfüllen können. Bemerkenswert ist auch die markante zyklonale Zirkulation, die mit der Kommakonfiguration zusammenhängt.

Die nächsten drei Abbildungen (Abbildung 18j–l) sollen die aus dem bisherigen Material abgeleiteten Vermutungen untermauern. Abbildung 18j, der Querschnitt der äquivalent-potentiellen Temperatur durch „exit region“ und Frontverstärkung soll dazu dienen, sowohl aussagekräftige, als auch im betrachteten Bereich möglichst eindeutige Isentropenflächen auszuwählen. Dies ist hier wiederum nicht ganz leicht. Die 315K Fläche liegt innerhalb einer Frontalzone, die die erwähnte Luftmassengrenze charakterisiert und darf von ca. 350 hPa über Prag (11520) bis ca. 900 hPa über Zagreb (13130) herangezogen werden. Die 320K Fläche liegt etwas höher und ist nur zwischen ca. 330 hPa über Prag bis ca. 700 hPa südlich von Zagreb eindeutig. Beide Flächen (Abbildung 18k, l) zeigen deutlich das Zusammenströmen von „warm conveyor belt“ und „dry intrusion“ über Österreich. Die Bewölkungsverstärkung entsteht im „warm conveyor belt“, der über Nordjugoslawien und Südostösterreich markant aufsteigt und orientiert sich, insbesondere in der höheren Fläche, parallel zu den Stromlinien. Dort ist im Zuge der Annäherung des Jet-Streak eine Aufsteilung der isentropen Flächen erfolgt, die das Aufsteigen dort möglich macht. Die Bewölkung endet im Nordosten dort, wo auch das Aufsteigen endet bzw. viel geringer wird.

Diese unterschiedlichen Auswirkungen des Jet-Streak bzw. Jet-Stream auf die Frontbewölkung ist eine Erweiterung der Vorstellungen über Bewölkungsphänomene und Jet-Streams: In seinem Bereich tritt sowohl schichtförmige mittlere und hohe Bewölkung auf, was vor allem auf der antizyklonalen Seite der Fall ist, als auch vertikal stark entwickelte Bewölkungsphänomene, die man vor allem in der linken „exit region“ findet.

4.3. „Jet-Streak-Welle“

„Jet-Streak-Wellen“ treten an der Rückseite frontaler Wolkenbänder auf. Sie zeigen zwar die für „klassische Wellen“ typische Ausbuchtungen der Bewölkung zur kalten Luft hin, weisen aber auch wesentliche Unterschiede auf. Im Zusammenhang mit klassischen Wellen, deren Wolkenformation relativ zum Wolkenband etwa ortsfest bleibt, tritt sekundäre Zyklogenese auf, und als Folge der Zirkulation im sich vertiefenden Tief bildet sich eine Spiralstruktur aus.

Bei „Jet-Streak-Wellen“ beobachtet man das nicht. Wie Abbildung 19a schematisch zeigt, wandert die Wolkenausbuchtung rasch am rückwärtigen Wolkenbandrand entlang, durchläuft dabei ein Stadium markantester Ausbuchtung, in dem meist eine stromabwärts weisende Wolkenfaser entsteht, geht aber dann in die eher großräumige antizyklonale Krümmung des Wolkenbandes im Bereich der Warmfront ein. Vergleicht man die vorhandenen physikalischen Bedingungen mittels

relevanter Parameterverteilungen, so erkennt man den Unterschied insbesondere im Feld der Temperaturadvektion. Während bei klassischen Wellen deutliche Maxima von WLA und KLA im Bereich der Bewölkungsausbuchtung unmittelbar nebeneinander liegen, was ein Ausdruck für die in der zyklonalen Zirkulation stattfindende Verlagerung verschieden temperierten Luftmassen ist, befinden sich die Bewölkungsformationen der „Jet-Streak-Welle“ innerhalb von KLA, ein Anzeichen dafür, daß dort kein Gegeneinanderführen unterschiedlich temperierter Luftmassen stattfindet.

Wie im Rahmen der Arbeit gesehen werden konnte, tritt auch diese satelliten-synoptische Kategorie bei einer Wechselwirkung zwischen Jet-Streak und Front auf. Im Gegensatz zur „zyklonalen Frontverstärkung“ ist jedoch der Winkel zwischen Front und Jet-Achse, repräsentiert z. B. durch TFP und Nullinie der Scherungsvorticity in 300 hPa, sehr klein, so daß Jet-Streak und Front nahezu parallel sind.

Betrachtet man zunächst nur das Jet-Niveau (Abbildung 19a), so erkennt man, daß die wellenförmige Ausbuchtung zunächst in der rechten „entrance region“ innerhalb eines Bereiches von KLA entsteht, dann aber rasch durch den Jet-Streak wandert, wobei die stromabwärts weisende Faser, die meist im Höhepunktsstadium der Jet-Streak-Welle auftritt, auch im stromabwärtigen Teil des Jet-Streak, also in der „exit region“, anzutreffen ist; hat die Wolkenausbuchtung den Jet-Streak quasi durchwandert und verlassen, löst sie sich rasch auf. Dieses Durchwandern erfolgt mit der absoluten und/oder der relativen Strömung, die größer ist, als die Verlagerungsgeschwindigkeit des Jet-Streak selbst.

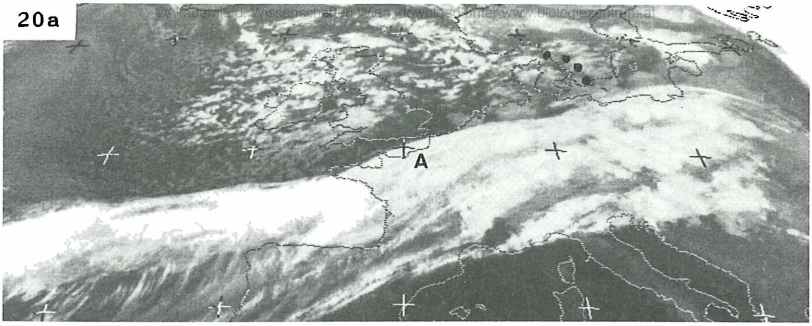
Untersuchungen auf isentropen Flächen eröffnen zusätzliche Aspekte, nämlich, daß die „Jet-Streak-Welle“, obwohl sie von der Lage her so deutlich mit dem Jet-Streak gekoppelt zu sein scheint, wesentlich besser mit anderen Modellen, nämlich dem „conveyor belt“-Modell, erklärbar ist (Abbildung 19b). Die „Jet-Streak-Wellen“ bilden sich dort, wo auf isentropen Flächen verschiedene relative Luftströme konvergieren: der aufsteigende „warm conveyor belt“, in dessen Bereich sich die frontale Bewölkung ausbildet und der aufsteigende Ast der trockenen Luftströmung.

Der Wolkenbandrand der Welle orientiert sich nach der in diesem Bereich vorhandenen relativen Strömung. Im Zuge der Steuerung stromabwärts gelangt die Welle jedoch in Bereiche, wo die beiden

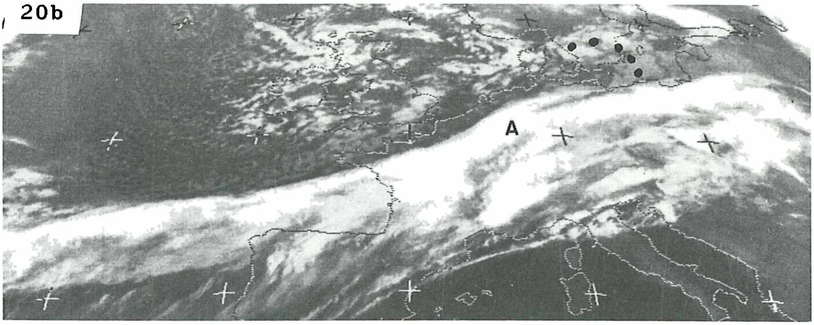
---

Abb. 20: Jet-Streak-Welle: 22.–23. 10. 86.
20a–d: IR, Meteosat; 20a: 22. 10./18 UTC, 20b: 22. 10./21 UTC, 20c: 23. 10./00 UTC, 20d: 23. 10./06 UTC; 20e: Isotachen 300 hPa, Frontsymbole: TFP, oben: 22. 10./18 UTC, Mitte: 23. 10./00 UTC, unten: 23. 10./06 UTC; 20f: PVA 300 hPa, Zeitabfolge wie bei 20e; 20g: Temperaturadvektion 500/1000 hPa, Zeitabfolge wie bei 20e; 20h–k: Parameter für 23. 10./00 UTC, 20h: abs. Windvektoren 300 hPa aus EZMW, strichliert: Stromlinien; 20i: rel. Windvektoren 300 hPa, Systemgeschwindigkeit: 255°/48 m/s; 20j: vertikaler Querschnitt der äquivalent-potentiellen Temperatur aus Radiosondenstationen; 20k: 320 K Fläche, ausgezogen: Isobaren, strichliert: relative Stromlinien, Systemgeschwindigkeit 255°/48 m/s. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.

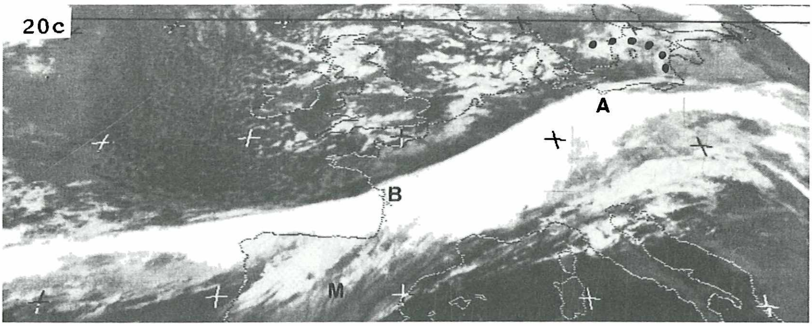
20a



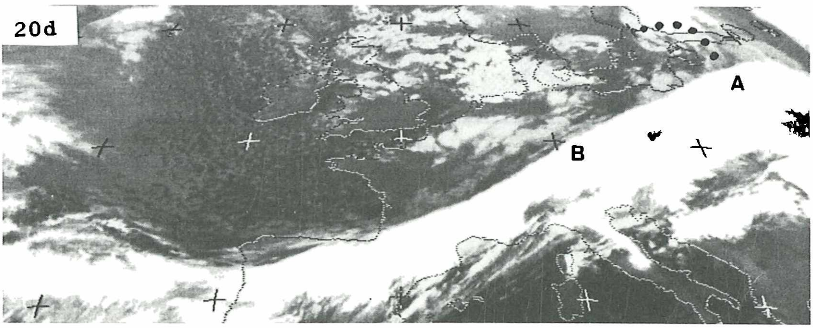
20b

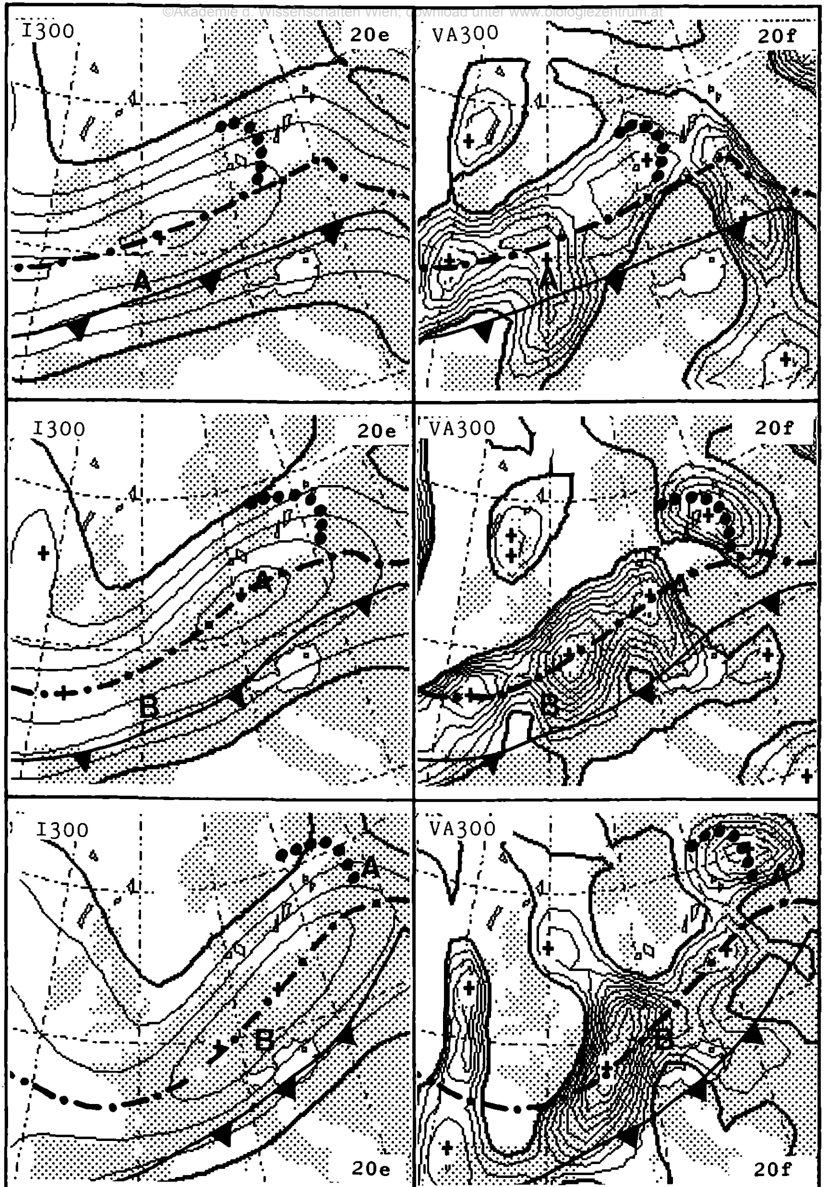


20c

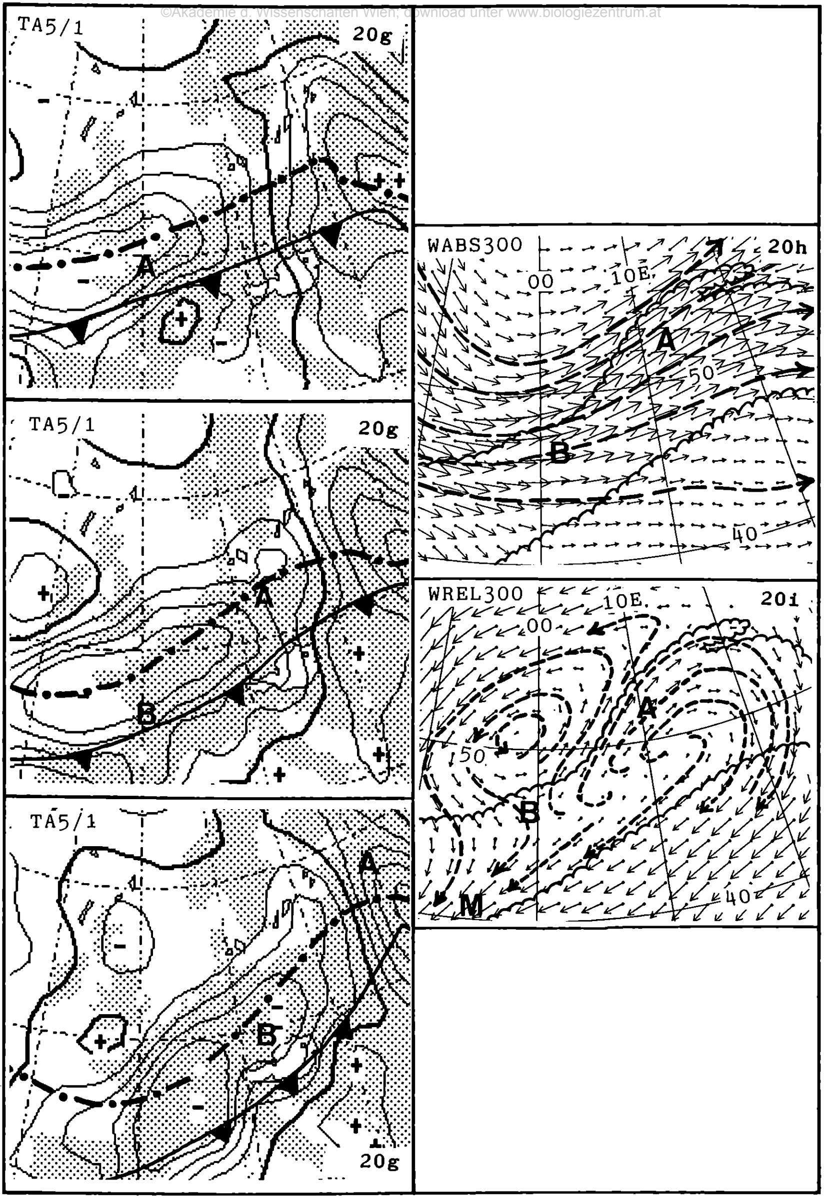


20d

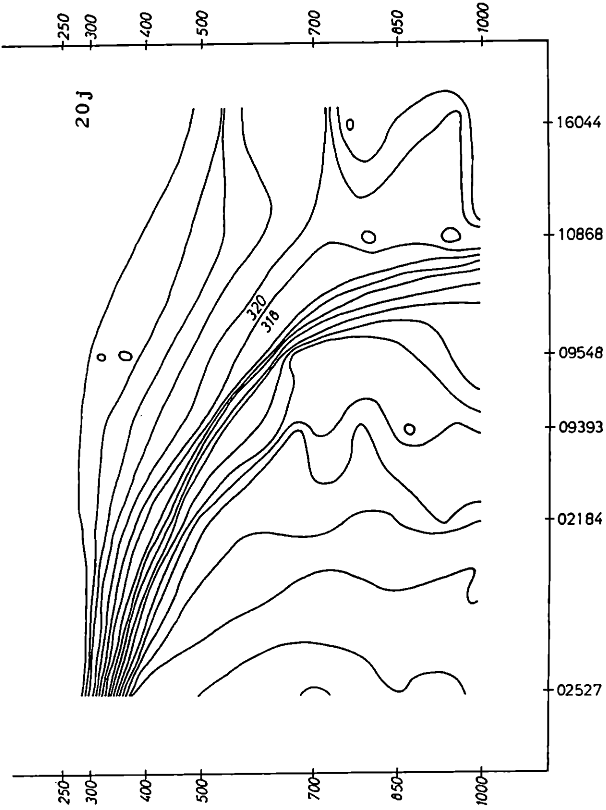


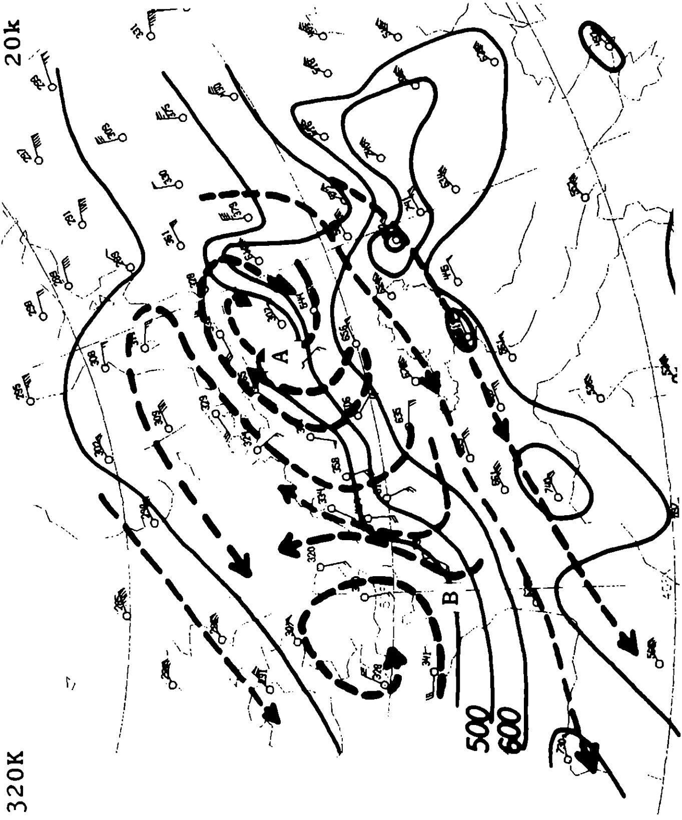


I300
20e
VA300
20f
A
I300
20e
VA300
20f
A
B
I300
VA300
A
B
20e
20f



TA5/1
20g
A
TA5/1
20g
A
B
TA5/1
A
B
20g
WABS300
20h
00
10E
A
50
B
40
WREL300
20i
10E
00
A
50
B
M
40


20j
250
300
400
500
700
850
1000
16044
10868
09548
09393
02184
02527
320
318


20K
320K
A
B
500
600

relativen Strömungen nicht mehr konvergieren, sondern parallel zu einander liegen; die Ausbuchtung verflacht.

Die Lage im Konvergenzbereich verschiedener Luftströme steht in gewissem Widerspruch zur vorher getätigten Aussage, nach der „Jet-Streak-Wellen" nicht im Grenzbereich kalter und warmer Luftmassen bzw. im Übergangsbereich von WLA zu KLA auftreten, sondern einzig innerhalb eines KLA Gebietes. Die Antwort liegt wohl darin, daß es sich hier in erster Linie um verschieden feuchte relative Luftströme in höheren Schichten handelt. Die kalte Luft muß in unteren Schichten bereits weit vorgedrungen und die Frontfläche über ein breites Gebiet geneigt sein, so daß sich die „Jet-Streak-Welle" im oberen Teil der Frontfläche ausbildet (Abbildung 19c).

Über die Vorstellung der „conveyor belts" gelangt man aber auch wieder zurück zu einem Zusammenhang mit dem Jet-Streak. Die polwärtige Begrenzung des „warm conveyor belt", die sogenannte „limiting stream line", ist im Jet-Niveau gleichzeitig die Achse stärkster Winde.

Da „Jet-Streak-Wellen" i. a. überwiegend aus hoher Bewölkung bestehen, scheint die PVA innerhalb der linken „exit" und der rechten „entrance region" und das mit den Querzirkulationen verbundene Aufsteigen nicht die maßgebende Ursache für die Bewölkungsbildung zu sein, sehr wohl aber für das Auftreten von konvektiver Bewölkung und Schauern unter dem hohen Wolkenschirm; diese sind im Satellitenbild zunächst noch verdeckt. Da jedoch die „Jet-Streak-Welle" den Jet-Streak durchwandert, die PVA Maxima aber an den Jet-Streak gebunden bleiben, werden beide Bewölkungsphänomene im Laufe der Entwicklung immer mehr entkoppelt.

Abbildung 20 gibt ein Beispiel wieder. Die Bildfolge (Abbildung 20a–d) demonstriert anhand der Welle A sehr gut die Entwicklungsstadien aus Abbildung 19a. Um 00 UTC (Abbildung 20c) bildet sich eine zweite Welle (B), die in weiterer Folge (hier nicht gezeigt), dieselben Entwicklungsstadien durchläuft. Die Lage der „Jet-Streak-Welle" relativ zum Jet-Streak, zum PVA Maximum sowie zur Temperaturadvektion wird in Abbildung 20e–g deutlich gemacht, Welle A liegt anfangs (18 UTC) stromaufwärts vom Jet-Streak-Zentrum innerhalb von PVA (Abbildung 20 e, f). Vom rein optischen Standpunkt, aber auch bewiesen durch diverse Parameter (hier nicht wiedergegeben), ist dies noch die „entrance region" Bereits sechs Stunden später (00 UTC) liegt A in der „exit region" und nicht mehr unter dem Einfluß von PVA, B bildet sich gerade in der rechten „entrance region" und liegt noch im PVA-Bereich. Zur PVA-Verteilung ist zu bemerken, daß die zum Jet-Streak gehörige Viererfeldverteilung durch auf der Rückseite der Front überlagerte Tröge stark gestört ist. Weitere sechs Stunden später hat A den Jet-Streak-Bereich vollkommen verlassen und ist im großräumig antizyklonal gekrümmten Bewölkungsbereich verschwunden; B hingegen hat sich dem Jet-Streak-Zentrum genähert und liegt noch in einem Bereich von

PVA. Die Temperaturadvektion (Abbildung 20g) zeigt, daß sich A und B innerhalb eines KLA-Gebietes bilden und bis zum Höhepunktsstadium auch unter diesem Einfluß bleiben; erst wenn die „Jet-Streak-Welle" in den antizyklonal gekrümmten Frontbereich einfließt, gelangt sie in einen WLA-Bereich, der die dort vorhandene Warmfront und den Warmsektor begleitet.

Zur PVA-Verteilung drängen sich noch einige zusätzliche Bemerkungen auf. Obwohl, wie schon bemerkt, die Verteilung im antizyklonalen Bereich sowie in der „entrance region" stark von der Krümmungsvorticity abhängt, kann in der linken „exit region" ein isoliertes, deutliches PVA-Maximum festgestellt werden. Es verlagert sich von Dänemark–Südschweden um 18 UTC über die Ostsee bis Finnland um 06 UTC, liegt vor dem Maximum von Scherungsvorticity und ist, wie in Kapitel 4.1. bereits beschrieben, mit einer EC- bzw. Komma-Konfiguration verbunden. Letztere ist deutlich isoliert von der über der Nordsee verbreitet vorhandenen Kaltluftbewölkung zu erkennen. Auch diese zellulare Bewölkung verstärkt und formiert sich im Laufe der Entwicklung, was aber mit dem Höhentrog sowie einer labilen Luftschichtung zusammenhängt.

Die nächste Parametergruppe (Abbildung 20h, i) zeigt für den 00 UTC Termin die relativen Stromlinien in 300 hPa. Wieder ist der Unterschied zwischen beiden Feldern gravierend. Während die absoluten Stromlinien (Abbildung 20h) die Bewölkungsausbuchtung der Welle A schneiden, zeigen die relativen Stromlinien in 300 hPa (Abbildung 20i) deutlich die Aufspaltung in relative Ströme verschiedenen Ursprungs. Dabei erkennt man einige bemerkenswerte Übereinstimmungen zwischen Stromlinien und Wolkenformationen. Der Wolkenrand von Welle und Faser orientiert sich nach der relativen Strömung und liegt etwa im Bereich der „Begrenzungsstromlinie" („limiting streamline"). Im Bereich der Welle B, die sich gerade erst ausbildet, erkennt man einen Sattelpunkt und das Konvergieren verschiedener relativer Ströme. Der nächste Termin (hier nicht wiedergegeben) enthält bereits deutlichere Konfigurationen bzgl. B.

Bemerkenswert ist außerdem die Orientierung des faserigen Wolkenteiles über Spanien von der Nordküste in südwestliche Richtung (M in Abbildung 20c, i); sie stimmt mit den relativen Stromlinien in diesem Bereich genau überein. Dazu ist festzustellen, daß auch dies eine Gegend ist, in der relative Ströme verschiedenen Ursprungs zusammentreffen.

Die letzte Parametergruppe (Abbildung 20 j, k) soll nun Aussagen über die Situation auf isentropen Flächen beisteuern. Zunächst sei ein Querschnitt der äquivalent-potentiellen Temperatur Θ_{ek} von Nord nach Süd durch die Front betrachtet (Abbildung 20j). Die Frontalzone ist mit starken Θ_{ek}-Gradienten sehr deutlich ausgeprägt und ist, ähnlich der schematischen Darstellung in Abbildung 19c, von ca 300 bis 700 hPa eher flach nach unten geneigt; erst südlich davon erfolgt ein extrem steiler

„Absturz“ zwischen Meiningen (09548) und München (10868). Der Bereich der Welle A, die in diesem Querschnitt gerade noch mit ihrem Westrand enthalten ist, liegt zwischen 500 und 400 hPa. Eine etwas über der starken Drängungszone liegende aber ungestörte Isentropenfläche ist die 320K Fläche. Auf ihr sollen Isobaren und relative Stromlinien analysiert werden (Abbildung 20k).

Die relative Strömung im Bereich von A ist nicht nur sehr gut parallel zum Wolkenbandrand, sondern steigt dort auch auf. Die Faser endet beim Übergang von Aufsteigen zu Absinken. Das Aufsteigen ist weiter südlich innerhalb der Frontbewölkung sehr deutlich, am Nordrand von A jedoch nur noch schwach; diese Konfiguration ist jener in Abbildung 19c, d dargestellten, sehr ähnlich. Bei Welle B kann man noch keine Parallelität zwischen Wolkenrand und relativen Stromlinien feststellen, da das System verglichen mit dem Netz der Radiosondenstationen bei weitem noch zu kleinräumig ist; sehr wohl aber ist der Konvergenzbereich zwischen „warm conveyor belt“ und „dry intrusion“ dort vorhanden. Letzteres ist bei Welle A nicht mehr so deutlich, da sie sich bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befindet, in dem beide relativen Ströme parallel zueinander sind.

4.4. „Fasern an der Achse“

Faserige, linienartig angeordnete hohe Bewölkung ist seit Beginn der Satellitenbildinterpretation als die typischste Form von Jet-Stream-Bewölkung gewertet worden.

Besonders auffallend sind einzelne Wolkenfasern, die, ihrer kalten Oberfläche wegen, im IR-Bild sehr deutlich hervortreten. Sie haben eine Breite, die meist weit unter 100 km bleibt aber eine Längserstreckung, die von wenigen 100 km bis zu mehreren 1000 km reichen kann. Satellitenbilder zeigen, daß solche „Fasern an der Achse“ sowohl antizyklonal als auch zyklonal gekrümmt sein können, daß sie Fronten unter verschieden großen, machmal auch nahezu rechten Winkeln kreuzen können. Zusammen mit Jet-Streaks betrachtet und in Abbildung 21a, b schematisch dargestellt, erkennt man, daß die Fasern überwiegend von der Jet-Streak-Mitte aus in die „exit region“ hineinreichen. Dennoch lassen Lage und Längserstreckung dieses Phänomens keine Zweifel daran aufkommen, daß die für Jet-Streaks typische Querzirkulation hier als Entstehungsursache nicht in Frage kommt.

Abbildung 21c zeigt die mit Fasern in Zusammenhang stehende typische Situation auf isentropen Flächen. Auch bei dieser satelliten-synoptischen Jet-Streak-Kategorie hat sich ein deutlicher Zusammenhang mit dem „conveyor belt“-Modell gezeigt: Wolkenfasern an der Achse bilden sich am Rande eines dem „warm conveyor belt“ vergleichbaren relativen Stromes zur trockenen Strömung hin aus und zwar in einem Bereich, wo beide aufsteigen. Dies ist mit großer Sicherheit im stromabwärtigen Teil eines Jet-Streak der Fall, was auch die Häufigkeit des Auftretens von Fasern in der „exit region“ erklärt. Der relative

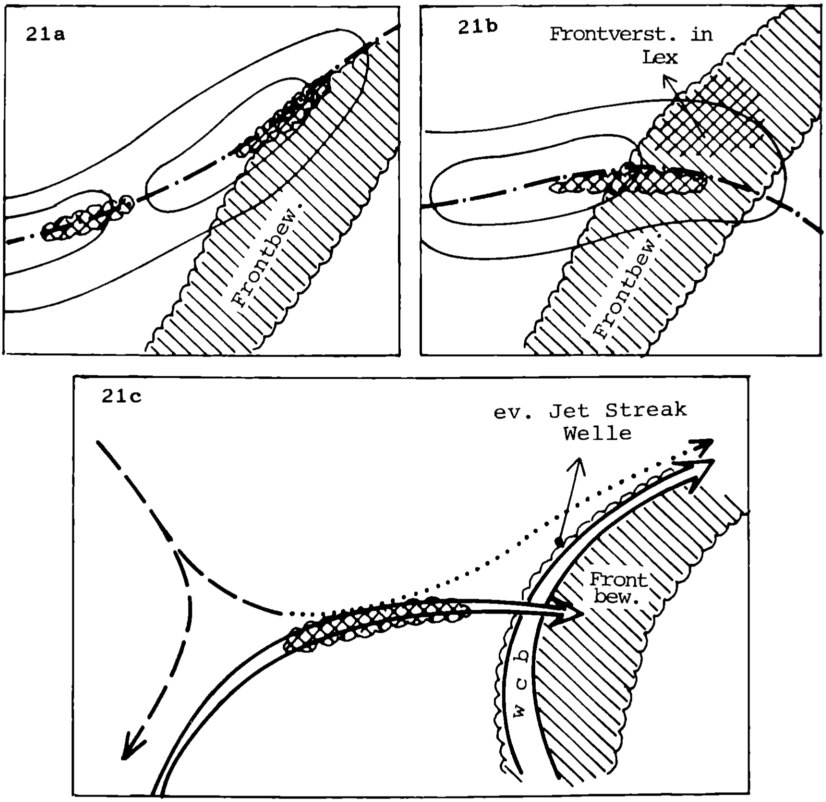


Abb. 21: Faser an der Jet-Achse; Schema.
21a, b: zwei typische Konfigurationen von Fasern, Frontbewölkungen (beide schraffiert) und Jet-Streak; ausgezogen: Isotachen; strichpunktiert: Jet-Achse; 21c: typische Verteilung der relativen Ströme: dicke offene Pfeile: aufsteigende Ströme („warm conveyor belt"), strichliert (punktiert): absinkende (aufsteigende) relative Ströme.

Luftstrom, in dessen Bereich die Faser liegt, kommt von Südwesten bis Westen und ist in mittleren und oberen Schichten vorhanden. Bei entsprechender Konfiguration, wenn z. B. Front und Faser nahezu einen rechten Winkel bilden, kann man Analoges auch in den relativen Luftströmungen erkennen (Abbildung 21c): Ein sanft ansteigender, in höheren Schichten befindlicher relativer Strom aus westlichen Richtungen ist dem mit der Front verbundenen, oft markant ansteigenden „warm conveyor belt" aus Ost bis Südost überlagert.

Allerdings erhebt sich die Frage, warum die Bewölkung nur in einer schmalen Faser an oder nahe der Jet Achse auftritt und nicht im gesamten Bereich der relativen Luftströme. Untersuchungen, die sich auf einen kleinen Maßstab wie etwa die Breite der Wolkenfasern beziehen, können

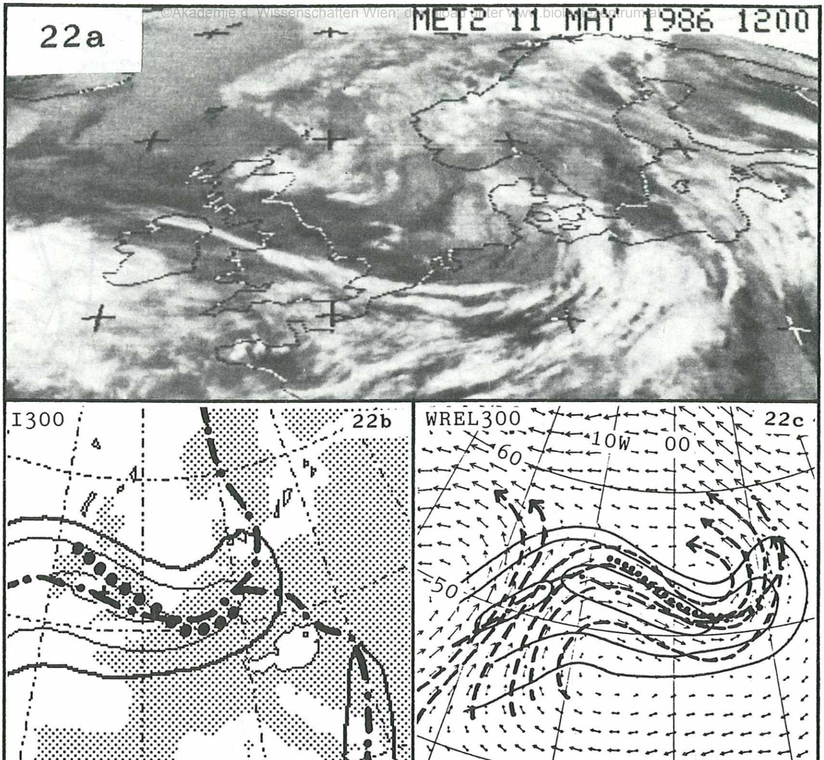
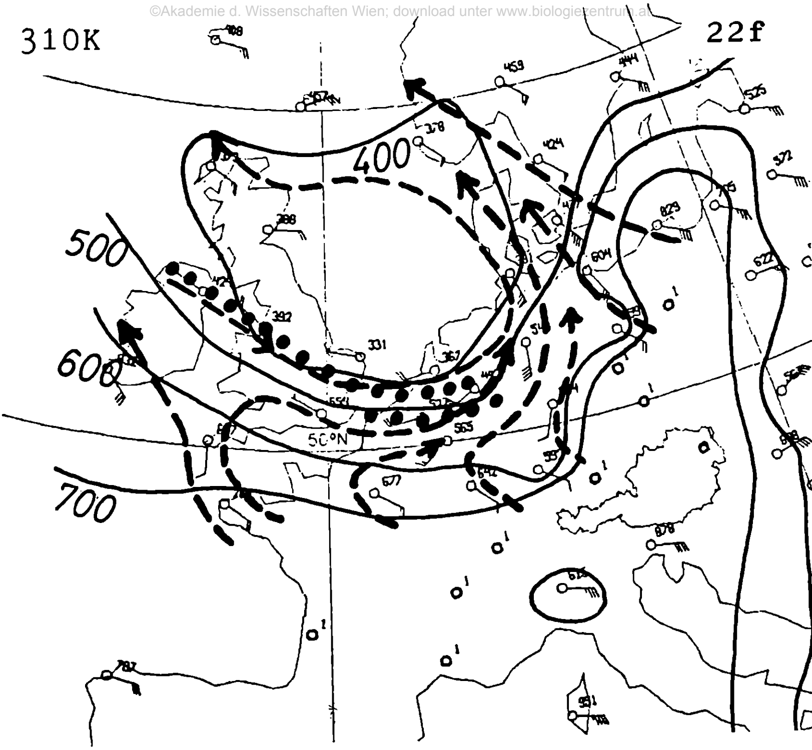
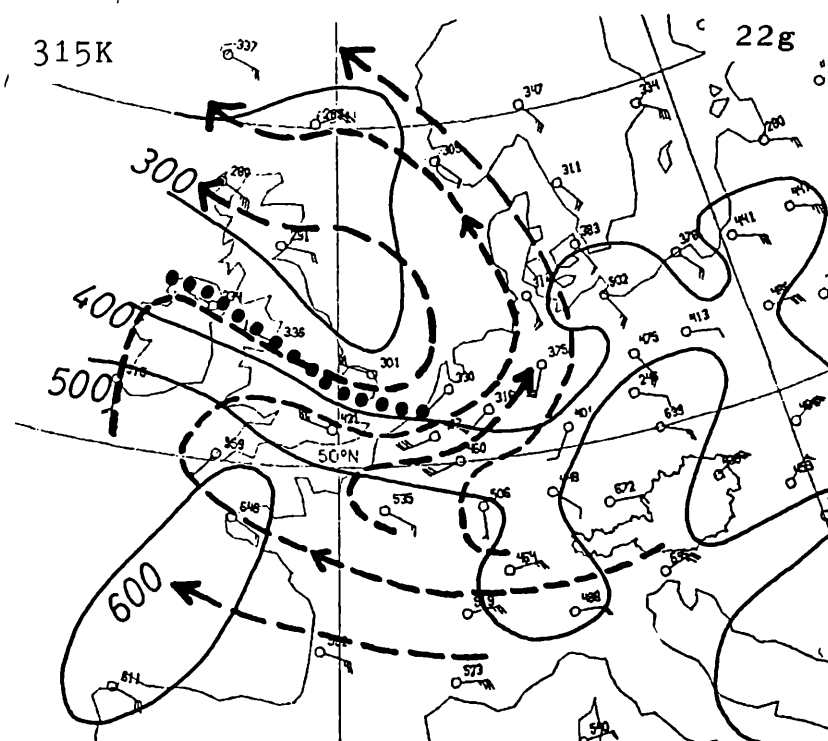


Abb. 22: Faser an der Jet Achse: 11. 5. 86/12 UTC.
22a: IR, Meteosat; 22b: Isotachen 300 hPa, strichpunktiert: Nullinie der Scherungsvorticity 300 hPa; 22c: rel. Windvektoren 300 hPa, Systemgeschwindigkeit: 275°/24 m/s; 22d: rel. Feuchte 500 hPa; 22e: rel. Feuchte 300 hPa; 22f: isentrope Fläche 310 K, ausgezogen: Isobaren, strichliert: relative Stromlinien, Systemgeschwindigkeit: 275°/24 m/s; 22g: wie 22f für 315 K. Punktierte Linie: Position der Faser(n) aus dem Satellitenbild; Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.


310K
22f
400
500
600
700
50°N


315K
22g
300
400
500
600
50°N

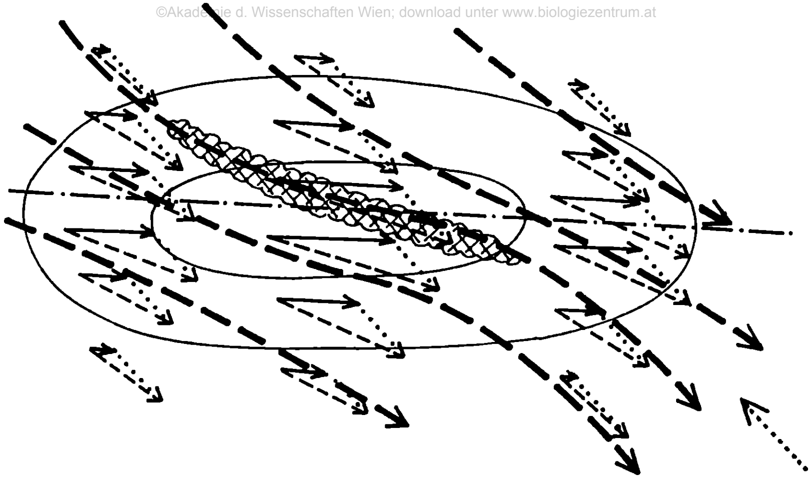


Abb. 23: Zusammenhang zwischen absoluter, relativer und Systemgeschwindigkeit im Bereich eines Jet-Streak bei Kreuzung der Jet-Achse durch eine Wolkenfaser; Schema. Ausgezogen: Isotachen, strichpunktiert: Jet-Achse, ausgezogene Pfeile: absolute Windvektoren, punktierte Pfeile: Systemgeschwindigkeit, strichlierte Pfeile: relative Windvektoren, schraffiert: Wolkenfasern, dick strichliert: relative Stromlinien.

mit Material in synoptischem Maßstab nicht durchgeführt werden. Allerdings bietet sich in diesem Zusammenhang die Modellvorstellung an, die in 2.2. beschrieben wurde: Durch Konvergenz unter der Jet-Achse entwickelt sich eine kleinräumige Zirkulationszelle mit Aufsteigen an der Achse und auf der antizyklonalen Seite aber Absinken im zyklonalen Jetbereich. Nimmt man diese Modellvorstellung als brauchbare Arbeitsgrundlage, so sind die Fasern das Ergebnis einer Überlagerung von (nachgewiesenem) Aufsteigen im „warm conveyor belt" und dem (hier nicht überprüfbaren) kleinräumigen Aufsteigen an der Jet-Achse.

Abbildung 22 enthält ein Beispiel zu dieser Problematik. Das Satellitenbild (Abbildung 22a) zeigt eine schmale Faser, die sich von Nordirland über Benelux bis ca 51N/10E erstreckt und über dem europäischen Kontinent eine Doppelstruktur aufweist. Sie liegt im Bereich eines Jet-Streak, der im westlichen Teil (Irland) leicht antizyklonal, im östlichen Teil (Deutschland) zyklonal gekrümmt ist (Abbildung 22b), beginnt etwas stromaufwärts von seinem Zentrum und reicht bis weit in die „exit region" hinein. Die Tatsache, daß die Faser von Irland bis Südostengland von der Jet-Achse abweicht und im zyklonalen Teil liegt, soll hier noch nicht diskutiert werden, sondern ist Gegenstand von Abbildungen 23 und 24. Hier soll mit Abbildung 22c–e demonstriert werden, daß die Faser an der Grenze eines dort in der oberen Troposphäre befindlichen relativen Lufstromes aus Südost bis Südwest liegt (Abbildung 22c). Dieser Bereich ist auch die Grenze zwischen feuchter und trockener Luft in der Höhe (Abbildung 22d, e). Die relativen Stromlinien in Abbildung 22f, g, die die Verhältnisse auf zwei isentropen Flächen zeigen, lassen wegen der geringen Stationsdichte über Irland den

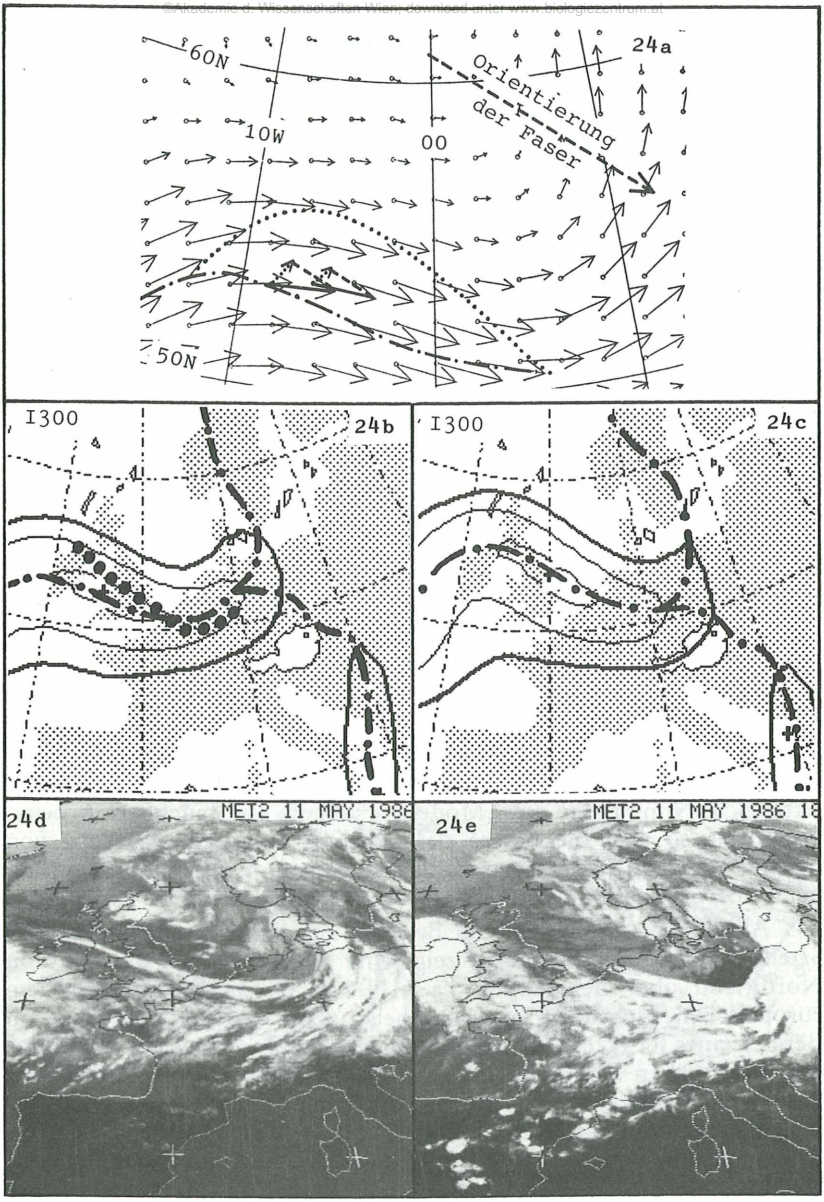


Abb. 24: Verlagerung der Jet Achse in Richtung der Faser. 24a: ausgezogene Pfeile: abs. Windvektoren 300 hPa, strichlierte Pfeile: rel. Windvektoren aus der Orientierung der Faser, punktierte Pfeile; resultierende Systemgeschwindigkeit, strichpunktiert: Jet Achse 11. 5./12 UTC, dick punktiert: Jet Achse 11. 5./18 UTC; 24b: Isotachen 11. 5./12 UTC; 24c: Isotachen 11. 5./18 UTC; 24d: IR, Meteosat, 11. 5./12 UTC; 24e: IR, Meteosat, 11. 5./ 18 UTC. Magnitude, Dimension und Isolinienwerte vgl. Tafel 3.

erwähnten relativen Luftstrom aus südlichen Richtungen nur erahnen. Diese Tatsache zeigt wieder deutlich, daß die relativen Stromlinien auf isobaren Flächen wegen ihrer guten räumlichen Auflösung unter anderem auch dazu nötig sind, die aus Radiosondendaten abgeleiteten Felder in den dafür geeigneten Höhen zu ergänzen.

Die relativen Stromlinien sind in beiden Flächen sehr gut parallel zur Wolkenfaser und zeigen von Nordirland bis in die Nordsee Aufsteigen, das im nördlichen Teil der Faser über dem Kontinent in Absinken übergeht; im südlichen Teil der Faser, dort wo die Doppelstruktur besteht, herrscht weiterhin Aufsteigen. Somit zeigt dieser Fall die wesentlichsten Grundzüge der Schemazeichnung in Abbildung 21.

Da also langgezogene Fasern oftmals die Lage in höheren Schichten befindlicher, sanft ansteigender relativer Luftströme anzeigen, sind sie ein für jeden Synoptiker leicht verfügbares Material für deren Identifizierung ebenso wie die der Jet-Achsen.

Vergleicht man mit den Fällen der Frontverstärkung, insbesondere der zyklonalen Frontverstärkung (Abbildung 14b), so stellt man auch dort diesen höheren relativen Luftstrom, der sich der vorgelagerten Frontbewölkung überlagert, fest. Es gibt aber zwei wesentliche Unterschiede, die in den meisten Beispielen auch nachgewiesen werden können: Im Falle einer Frontverstärkung sinkt der relative Strom bis zur Front ab und steigt erst wieder über der Front, nach Aufspaltung in zwei Äste, auf; im Falle einer Faser herrscht im gesamten Bereich, also auch vor Einholen der Front, Aufsteigen. Außerdem kommt er im Falle der Frontverstärkung eher aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen, im Falle der Faser aus deutlich südlichen Richtungen.

Zur Orientierung von Fasern und Jet-Achsen sind noch einige zusätzliche Bemerkungen angebracht. Nicht selten und so auch in der Fallstudie von Abbildung 22, schneiden Wolkenfasern die Nullinie der Scherungsvorticity, was zu dem Schluß führen könnte, daß entweder die Nullinie der Scherungsvorticity in 300 hPa die Jet-Achse nicht repräsentiert oder daß die Fasern nichts mit der Jet-Achse zu tun hätten. Wie gezeigt werden konnte, gibt es aber noch eine andere, durchaus prognostisch verwertbare Antwort. Die Wolkenfasern sind in einem solchen Fall nach dem relativen Wind orientiert; Abbildung 22c, f, g haben dies schon sehr deutlich gezeigt.

Die Bedeutung des relativen Windes für die Form der Wolkensysteme ist schon länger in der Satellitenmeteorologie bekannt und im Rahmen dieser Arbeit auch schon erwähnt worden. Aus dem hier gefundenen Zusammenhang kann aber eine prognostische Schlußfolgerung gezogen werden. Wie Abbildung 23 schematisch zeigt, erhält man unter der Annahme einer für einen Jet-Streak typischen Verteilung der absoluten Windvektoren und der Vorgabe einer Systemverlagerung relative Windvektoren, deren Stromlinien deutlich eine Neigung zur Jet-Achse zeigen. Die Richtung ist von der hier willkürlich gewählten Systemgeschwindigkeit abhängig. Nun kann man den umgekehrten Weg

gehen und aus einer Subtraktion der, aus dem numerischen Feld abzulesenden, absoluten Windvektoren und dem aus der Orientierung der Faser gewonnenen relativen Windvektor die Systemgeschwindigkeit extrahieren. Letztere ist, wenn man den Jet-Streak als „System" betrachtet, ein Hinweis für eine Verlagerung der Jet-Achse.

Abbildung 24 wendet dies für die Fallstudie von Abbildung 22 an. Wie erwähnt, weicht um 12 UTC die Faser im Bereich Irland weit von der Jet-Achse ab und nähert sich ihr dann über dem Kontinent. Subtrahiert man im interessanten Bereich von den absoluten Stromlinien einen mittleren Vektor der relativen Strömung aus der Orientierung der Faser (Abbildung 24b, d), so erhält man eine Systemgeschwindigkeit, die eine deutliche Verlagerung nach Nord bis Nordost anzeigt (Abbildung 24a). Ihr folgt das „System", der Jet-Streak liegt mit seiner Achse im Bereich der Abweichung sechs Stunden später wesentlich nördlicher (Abbildung 24b, c), und, obwohl sich ein Teil der Faser aufgelöst hat, herrscht nun Übereinstimmung zwischen Scherungsnullinie und Nordrand der zugehörigen Bewölkungssysteme (Abbildung 24e).

Wolkenfasern sind keine Phänomene, die sich durch signifikante Wettererscheinungen wie Schauer und Gewitter bemerkbar machen. Wie aus der Luftfahrt bekannt, tritt jedoch häufig eine gefährliche Begleiterscheinung auf, nämlich „clear air turbulence"

4.5. Zusammenfassende Bemerkungen

Mehrere Punkte scheinen erwähnenswert:

I. Modellvorstellungen und Parameterfelder

1. Folgende Modelle können als physikalische Grundlage der in dieser Arbeit betrachteten typischen Wolkenkonfigurationen ganz oder zumindest teilweise herangezogen werden:

- das Jet-Streak-Modell von Uccellini und Johnson
- das „conveyor belt"-Modell
- die Vorstellung kleinräumiger vertikaler Zirkulationen im Jet-Niveau.

Zusammen angewandt, können drei-dimensionale konzeptionelle Modelle satelliten-synoptischer Jet-Streak-Kategorien formuliert werden, die erweiterte Aussagen gegenüber jedem einzelnen Modell liefern. Von den angeführten kann das Jet-Streak-Modell auch mit dem üblicherweise operationell vorhandenen numerischen Analyse- und Prognosematerial routinemäßig angewendet werden.

2. Einige wichtige Modifikationen des idealisierten Jet-Streak-Modells betreffen:

- Übergreifen von PVA auf die rechte „exit region" bei Vorhandensein von zyklonaler Krümmungsvorticity
- Absinken hinter Fronten auch in der linken „exit region".

3. Eine Erweiterung der „conveyor belt"-Vorstellungen auf isentropen Flächen tritt zumindest bei zwei satelliten-synoptischen Kategorien auf (siehe unten 5. b. und 7. c.): Ein in der oberen Troposphäre

vorhandener relativer Luftstrom aus Südwest bis Nordwest, in dem es Bereiche mit Aufsteigen gibt.

II. Wolkenformationen und satelliten-synoptische Kategorien

4. In Zusammenhang mit Jet-Streams tritt nicht nur, wie bisher allgemein beschrieben, Bewölkung mit hohem faserigem Charakter auf, sondern auch vertikal ausgedehnte und/oder mehrschichtige Bewölkung.

5. Vertikal entwickelte Bewölkung darf man vor allem in der linken „exit region" eines Jet-Streak erwarten; sie manifestiert sich in zwei typischen Kategorien:

a) EC und/oder Komma: Diese treten bei einer Überlagerung von Jet-Streak-Zirkulation und kurzwelligem Trog auf;

b) Verstärkung der Frontbewölkung auf der zyklonalen Seite: Diese Kategorie tritt dann auf, wenn sich Front und Jet-Streak unter einem großen spitzen Winkel (auch senkrecht) kreuzen.

6. Faserige und/oder hohe Bewölkungsphänomene im Jet-Streak sind vor allem mit Hilfe der „conveyor belts" erklärbar.

7. Faserige und/oder schichtförmige höhere Bewölkung ist mit drei unterschiedlichen Kategorien verbunden:

a) Verstärkung der Frontbewölkung auf der antizyklonalen Seite: Diese Kategorie tritt bei einem sehr kleinen spitzen Winkel zwischen Front und Jet-Streak auf, wobei sich die Bewölkung in einem auf der geneigten Isentropenfläche aufsteigenden relativen Luftstrom bildet;

b) „Jet-Streak-Wellen": Sie bilden sich im Konvergenzbereich der relativen Ströme „warm conveyor belt" und „dry intrusion" und orientieren sich nach der dort herrschenden relativen Strömung;

c) Fasern an der Jet-Achse: sie zeigen einen noch höheren relativen Luftstrom an.

An dieser Stelle drängen sich zwei Fragestellungen auf:

- Wie häufig sind diese Phänomene, oder anders formuliert: Ist überhaupt ein synoptischer Bedarf gegeben?
- Wie kann das neu gewonnene, umfassendere Wissen in die Wetterprognose einbezogen werden?

Zu diesen Fragen, die den in Kapitel 1. formulierten Problemstellungen B und C entsprechen, soll in den nächsten zwei Kapiteln Stellung genommen werden.

5. Statistische Untersuchung der satelliten-synoptischen Jet-Streak-Kategorien

Um die Häufigkeit des Auftretens und damit die synoptische Notwendigkeit einer Beschäftigung mit diesen Phänomenen zu ergründen, wurden alle Jet-Streak-Episoden im Bereich Atlantik sowie West- und Zentraleuropa innerhalb eines Jahres untersucht. Davon wurden jene Ereignisse, die über dem datenmäßig gut belegten europäischen Kontinent im Zeitraum Februar—November 1986 auftraten, mittels SATMOD bearbeitet. 60 Jet-Streak-Episoden wurden gezählt und einer eingehenden Untersuchung unterworfen. Dabei wurden alle Fälle mit

Hilfe der grundlegenden Parametergruppe diagnostiziert, wobei folgende Bilder bzw. Karten benutzt wurden: Satellitenbilder in Graustufen- und Falschfarbendarstellung, Isotachen, Vorticity mit Krümmungs- und Scherungsanteil und Vorticityadvektion in 300 hPa, Divergenz und Omega in mehreren Niveaus, thermischer Frontparameter sowie absolute und relative Topographien. Erst von den so bearbeiteten und in die einzelnen Kategorien eingeordneten Fällen wurden einige ausgewählt, die mit der erweiterten Parametergruppe analysiert wurden (vgl. Fallstudien in Kapitel 4.).

Die folgende Tabelle enthält die Einteilung in satelliten-synoptische Kategorien, ihre Kurzbeschreibung (die meisten von ihnen wurden in Kapitel 4. ausführlicher beschrieben) und Häufigkeiten für den europäischen Kontinent im Zeitraum Februar bis November 1986.

Tabelle 1: Satelliten-synoptische Kategorien, Februar bis November 1986, europäischer Kontinent

Kategorie	Kurzbeschreibung	Häufigkeit
„EC (Ko) in lex“	EC oder Komma Konfiguration in der linken „exit region“ eines Jet-Streak, meist zusammen mit einem kurzwelligen Trog	17
„zykl. Frontverstärkung“	Kreuzung von Jet-Streak und Front mit Bewölkungsverstärkung in der linken „exit region“, hochreichende Bewölkung, Cb's	19
„antizykl. Frontverstärkung“	Kreuzung von Jet-Streak und Front mit Bewölkungsverstärkung nur in höheren Schichten, schichtförmige Bewölkung	5
„Jet-Streak-Welle“	wellenförmige Ausbuchtung am Wolkenbandrand, die sich nicht verwirbelt, hohe Bewölkung	11
Wolkenfasern: „Faser an der Achse“	schmale einzelne Wolkenfaser an (bzw. sehr nahe bei) der Jet-Achse, Längserstreckung: mehrere 100 bis 1000 km; Breite: wenige km bis max 100 km, hohe Bewölkung	25
„Faser im antizykl. Jet-Bereich“	abgesehen von Lage, wie vorher	15
„Faser im zykl. Jet-Bereich“	abgesehen von Lage, wie vorher	8
„Scherungsband“	langes und breites Wolkenband im antizykl. Jetbereich; es gibt Typen mit dichter, dickerer Bewölkung ebenso wie mit nur faseriger, hoher Bewölkung	18
komplexe Wolkensysteme	bestehen meist aus einer Kombination der vorigen Kategorien, die nur mit detaillierteren Untersuchungen trennbar sind	13

Diese Häufigkeiten lassen den Schluß zu, daß Jet-Streaks in der weitaus überwiegenden Anzahl der Fälle mit spezifischen Bewölkungskonfigurationen verbunden sind: Innerhalb von 9 Monaten sind über dem europäischen Kontinent bei 60 Jet-Streak-Episoden ca. 130 Bewölkungs-

phänomene aufgetreten. Nur 2 Episoden haben keine typischen Wolkenkonfigurationen gezeigt. Von diesen 130 Wolkenformationen sind zumindest 49 mit markanten Wettererscheinungen wie Cb's, Schauern und Gewittern verbunden gewesen. Diese Zahlen sind wohl ein deutlicher Beweis für die synoptische Signifikanz des Phänomens und die Notwendigkeit, sie auch im operationellen Vorhersagedienst im Auge zu behalten.

Um die äußerst geringe Zahl von Jet-Streaks ohne typische Bewölkungskonfigurationen zu erhärten, wurde ein zweiter Satz von abermals ca. 60 Jet-Streak-Episoden (aus 1987) mit etwas reduziertem numerischem Material (Isotachen, Vorticity und PVA in 300 hPa, Satellitenbilder) auf das Auftreten der in Tabelle 1 angeführten satellitensynoptischen Kategorien hin untersucht. Dabei haben sich etwa dieselben Häufigkeiten ergeben; insbesondere war die Anzahl der Fälle „keine typischen Wolkenkonfigurationen" mit 4 wiederum sehr gering. Diese unterstützende Untersuchung erhärtet die Ergebnisse der Tabelle 1.

6. Prognostische Anwendungen

Wie bereits in Kapitel 3. diskutiert, geht es in dieser Arbeit um eine Auswertung von Satellitenbildern, die sich auf die Erkennung von typischen Signaturen konzentriert. Zusammen mit relevanten meteorologischen Parametern betrachtet, ist dies ein semi-quantitatives Verfahren. Inwieweit können solche Methoden bzw. Untersuchungen prognostisch angewandt werden? Zwei Möglichkeiten dafür werden im folgenden gezeigt: 1.) die Überprüfung der Güte quantitativer prognostischer Größen (z. B. Niederschlag) bei Vorhandensein bestimmter satellitensynoptischer Kategorien; 2.) die Erfassung des herrschenden physikalischen Zustandes und damit die Wahl des anzuwendenden konzeptionellen Modelles aufgrund des optischen Eindrucks im Satellitenbild; die Überprüfung der getroffenen Auswahl durch relevante diagnostische Parameter und deren weitere Verfolgung in prognostischen Karten; für solch eine Vorgangsweise haben sich in der Satellitenmeteorologie Entscheidungsbäume besonders bewährt.

6.1. Diagnostische und prognostische Aussagen über Niederschlagsmengen

Für diese Problemstellung bieten sich die wetterintensiven Kategorien „EC (Komma) in linker exit region" und „Frontverstärkung in linker exit region" an.

Als erste Testreihe dienten 8 Episoden der genannten Kategorien mit jeweils bis zu drei Terminen aus dem der Untersuchung zugrundeliegenden Datenreservoir von 1986. Sie wurden auf drei Fragestellungen hin untersucht:

1.) Treten auf dem Verlagerungsweg der PVA-Maxima in der linken „exit region" größere Niederschlagsmengen auf als in der Umgebung?

2.) Wie gut ist die Übereinstimmung der relevanten PVA-Maxima aus EZMW-Analyse- und Prognosefeldern?

3.) Wie gut stimmen die tatsächlich aufgetretenen Niederschlagsmengen mit dem vom EZMW-Modell prognostizierten Mengen überein?

Zur Beantwortung der 1. Frage wurden aktuelle 6stündige Niederschlagsmengen analysiert und in Form von Klassenwerten an Gitterpunkten des zugrundeliegenden EZMW-Netzes angegeben. Dies geschah innerhalb des jeweiligen Verlagerungsweges der analysierten PVA-Maxima sowie innerhalb einer synoptisch sinnvoll gewählten Umgebung dieses Verlagerungsweges. Dabei wurden nur Gitterpunkte über Land berücksichtigt.

Für eine „synoptisch sinnvolle“ Umgebung wurde Augenmerk darauf gelegt, den größten Teil der Gitterpunkte rechts und links sowie auf der Rückseite des Verlagerungsweges der PVA-Maxima zu erhalten.

Zur Beantwortung der 2. Frage wurde die geographische Position der Zentren der PVA-Maxima in 300 hPa aus den korrespondierenden Analyse- und Prognosefeldern verglichen.

Zur Beantwortung der 3. Frage wurden an den EZMW-Gitterpunkten innerhalb des Verlagerungsweges der PVA-Maxima die oben beschriebenen analysierten Niederschlagsmengen den prognostizierten Modellniederschlägen (ebenfalls in Klasseneinteilung) gegenübergestellt; dabei wurden wieder nur Gitterpunkte über Land bewertet.

Folgende Ergebnisse können formuliert werden:

Ad 1.):

Unter Berücksichtigung der geographischen Lage der einzelnen Episoden kamen für diese Untersuchung 11 6stündige Perioden in Betracht.

Aus Tabelle 2 erkennt man, daß die Gitterpunkte innerhalb des 6stündigen Verlagerungsweges der PVA-Maxima in 300 hPa überwiegend, nämlich in 81 %, Niederschläge aufweisen. Zwar sind in 43 % nur Spuren vorhanden (Klasse >0–<1 mm/6h), aber in 38 % treten größere Mengen auf. Die Gitterpunkte innerhalb der Umgebung des Verlagerungsweges weisen nur in 36 % Niederschläge auf und davon sind nur 9 % größer als 1 mm/6h.

Tabelle 2: Relative Häufigkeiten des Auftretens von Niederschlagsmengen in mm/6h an Gitterpunkten; obere Reihe: innerhalb des Verlagerungsweges V der PVA-Maxima (Anzahl N = 233); untere Reihe: innerhalb ihrer Umgebung U (Anzahl N = 288)

	O	>0–<1	1–<5	5–<10	10–<15	>15
V	19	43	25	9	3	1
U	64	27	8	0.5	0.5	

Ad 2.):

Für den Vergleich der analysierten und prognostizierten PVA-Maxima kamen 16 Termine aus den bearbeiteten Episoden in Betracht. Die Punkte in Abbildung 25 zeigen die Ergebnisse für die Testserie 1986.

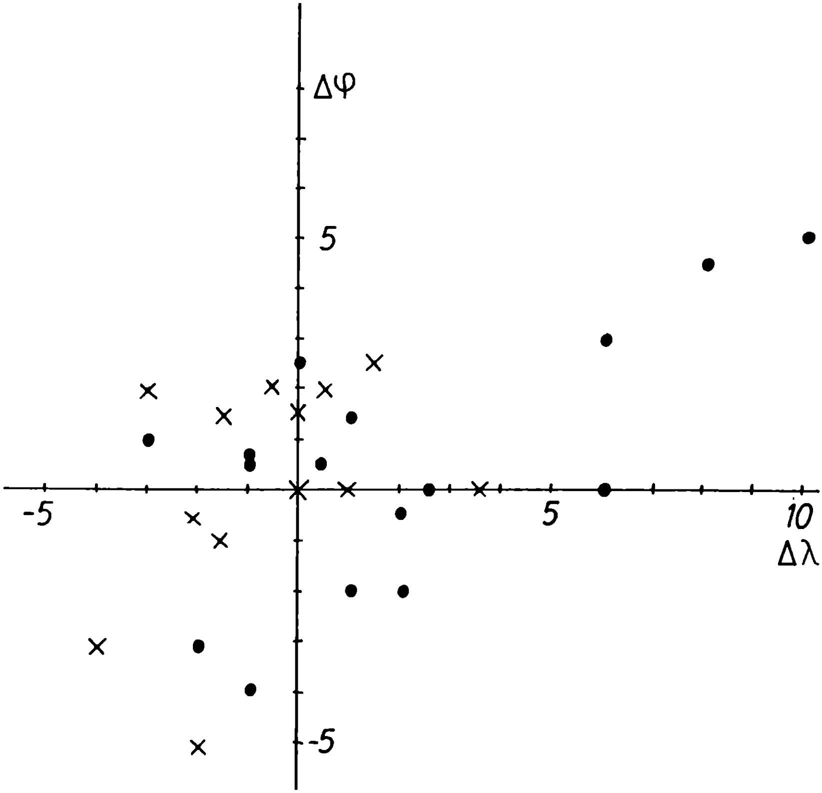


Abb. 25: Differenz der geographischen Längen und Breiten der PVA-Maxima aus Analyse- und Prognosedaten von EZMW.
Punkte: Fälle aus dem Datenset 1986, Kreuze: Fälle aus dem Datenset 1989. Prognosenzeitraum: 18–30 Stunden.

12 Fälle zeigen Übereinstimmungen innerhalb von 4 Grad. Im Mittel ergibt das folgende Abweichungen zwischen den Zentren der analysierten und prognostizierten PVA-Maxima: – 0.4 Grad für die geographische Breite und 0.1 Grad für die geographische Länge.

In 4 Fällen mußten größere Abweichungen festgestellt werden. Dabei stellte sich heraus, daß die vorhergesagten PVA-Maxima vor allem stromaufwärts auftraten, die Vorhersage also eine zu langsame Verlagerung anzeigte: Im Mittel 3.1 Grad für die geographische Breite und 7.5 Grad für die geographische Länge. Für diese Fälle gilt jedoch, daß abgesehen von der Lageunterschätzung das Auftreten der hier betrachteten Kategorien als Ganzes im Vorhersagematerial erfaßt wurde (also Jet-Streak, Front und PVA-Maximum in der linken „exit region“).

Ad 3.):

Für diesen Vergleich kamen, wie bei 1.), 11 6stündige Perioden in Frage. In allen Fällen zeigte sich eine, teils auch starke, Unterschätzung der Niederschlagsmengen durch das EZMW-Modell.

Vergleicht man die Isolinien mit dem jeweils höchsten Wert (Tabelle 3), so ergibt sich eine mittlere Unterschätzung von 6 mm/6h, also eine Unterschätzung von 1,5 der gewählten Klassen.

Tabelle 3: Vergleich der Isolinien mit dem jeweils größten sechsstündigen Niederschlagswert aus Synopmeldungen und aus dem EZMW-Modell:

Synop	10	5	5	1	10	10	1	15	5	5
EZMW	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1

Detailliertere Untersuchungen sind in Tabelle 4 wiedergegeben. Sie enthält den Vergleich von sechsstündigen analysierten und prognostizierten Niederschlagsmengen an den Gitterpunkten innerhalb des Verlagerungsweges der PVA-Maxima in 300 hPa. Betrachtet man alle Klassen, so werden 65 % vom Modell richtig erfaßt, 7 % über- und 28 % unterschätzt. Allerdings kommen die 65 % überwiegend durch die Klasse <1 mm/6h zustande, in welcher sowohl Ereignisse ohne Niederschlag als auch mit Spuren enthalten sind. Betrachtet man nur Klassen ab 1 mm/6h bzw. ab 5 mm/6h, so ergibt sich ein drastisch verändertes Bild mit einer starken Unterschätzung der Niederschlagsmengen durch das EZMW-Modell.

Tabelle 4: Relative Häufigkeiten des Vergleiches von analysierten (RRa) und prognostizierten (RRp) Niederschlagsklassen (Fallanzahl N = 206)

RRp / RRa	<1	1−<5	5−<9	>9
<1	55	7		
1−<5	16	10		
5−<9	4	5		
>9	2	1		

RRa-Klassen:	richtig	überschätzt	unterschätzt
alle Klassen	65	7	28
ab 1 mm/6h	28		72
ab 5 mm/6h			100

Da sich aus diesen Ergebnissen sowohl die Möglichkeit einer prognostischen Erfassung der satelliten-synoptischen Kategorien als Ganzes als auch eine einfache Überprüfung und Korrektur der vorhergesagten Niederschlagsmengen abzeichnet, wurden in einer dreieinhalbmonatigen Testserie (Jänner bis Mai 1990) täglich im Rahmen des Satellitenreports (ZWATZ-MEISE und G. MAHRINGER 1990) die Jet-Streak-Kategorien für 06 UTC diagnostiziert und, wenn solche vorhanden waren, aktuelle Prognosen für 12 und 18 UTC desselben Tages

formuliert. Die Verifikation erfolgte unmittelbar anschließend. Dabei wurde zunächst das Vorhandensein sowie die Übereinstimmung der Wolkenkonfigurationen mit den vorhergesagten Parametern überprüft.

Folgende Kriterien wurden dieser zunächst noch eher qualitativen Verifikation zugrundegelegt: Bei EC(Ko) muß die Wolkenformation im PVA-Maximum in der linken „exit region" liegen und die Scherungs-Vorticity einen hohen Anteil an der gesamten Vorticity ausmachen; der horizontal und/oder vertikal verstärkte Bewölkungsteil des frontalen Wolkenbandes muß ebenfalls im PVA-Maximum und der linken „exit region" zu finden sein. In Tabelle 5 bedeutet die Bewertung „sehr gut" eine genaue geographische Übereinstimmung, während bei „gut" zugelassen wird, daß die Bewölkung über das PVA-Maximum hinausreicht. Bei „hinreichend" darf eine Abweichung zwischen Wolkenformation und PVA-Maximum in linker „exit region" bis zu 5 Grad auftreten.

13 Episoden konnten behandelt werden, davon fanden 5 über dem europäischen Kontinent statt, konnten also durch quantitative Auswertungen z. B. der Niederschlagsmengen überprüft werden.

Tabelle 5: Bewertung der Erfassung der satelliten-synoptischen Kategorien aufgrund der Übereinstimmung mit der Bewölkungskonfiguration

	sehr gut	gut	hinreichend	schlecht
06 UTC	8	4	1	
12 UTC	8	2	1	2
18 UTC	4	3	2	4

Tabelle 5 zeigt überwiegend positive Ergebnisse und unterstützt somit die Möglichkeit einer prognostischen Erfassung der beiden behandelten Kategorien für den Zeitraum einer „sehr kurzfristigen Prognose". Mit zunehmendem Vorhersagezeitraum sind jedoch auch zunehmend Fehlprognosen vorhanden. Von den 4 schlechten Fällen um 18 UTC sind 3 tatsächlich auf das Prognosematerial zurückzuführen, da die Analysefelder gute Übereinstimmung zeigen; ein Fall erwies sich im nachhinein nicht als typischer Jet-Streak-Fall.

Die Auswertung der 5 Episoden über dem europäischen Kontinent (mit jeweils bis zu 3 Terminen) konzentrierte sich, wie bei der ersten Testserie, auf 3 Fragestellungen, die des etwas anderen Materials wegen von den vorher formulierten leicht abweichen:

1.) Wie gut werden die satelliten-synoptischen Kategorien von den prognostizierten Parameterfeldern erfaßt?
2.) Treten in der linken „exit region" gegenüber der Umgebung verstärkte Wettererscheinungen auf?
3.) Wie gut stimmen die prognostizierten mit den tatsächlich eingetretenen Niederschlagsmengen überein?

Wie bei der ersten Testreihe wurden dazu die Positionen der Zentren der prognostizierten PVA-Maxima mit denen aus den Analysekarten verglichen, aktuelle Niederschlagsanalysen an Gitterpunkten innerhalb des sechsstündigen Verlagerungsweges der PVA-Maxima mit jenen in

einer Umgebung und mit prognostizierten Mengen. Zur Beantwortung der 1. Frage standen 13 Termine zur Verfügung, für die 2. und 3. Frage nur 8 Perioden, die gesicherte Aussagen liefern konnten. Dies war dann der Fall, wenn sowohl für den Verlagerungsweg der PVA-Maxima als auch gleichzeitig für seine Umgebung ausreichend Gitterpunkte über Land zur Verfügung standen.

In Abbildung 25 geben die Kreuze die Werte für die Testserie aus 1989 an. Die meisten Punkte liegen innerhalb von 3 Grad Differenz und verglichen mit der ersten Testserie beträgt die größte Abweichung nur 5 Grad. Berechnet man Mittelwerte aller Termine, so erhält man eine ausgezeichnete Übereinstimmung (0,2 Grad für die geographische Breite und 0,3 für die Länge); allerdings ist sie für die einzelnen Termine größer (maximal 1,5 Grad) und zeigt für 06 UTC eine Verschiebung südwestwärts des prognostizierten PVA-Maximums gegenüber dem analysierten, für 12 und 18 UTC jedoch eine leichte nach Nordosten. Ob diese Unterschiede modellbedingt sind, kann aus dieser kleinen Fallanzahl wohl nicht geschlossen werden. Jedoch kann die Frage nach einer Erfassung der Jet-Streak-Kategorie durch das Prognosematerial deutlich positiv beantwortet werden.

Tabelle 6 entspricht Tabelle 2. Auch die Verteilung der relativen Häufigkeiten der Niederschlagswerte (in Klassen) an Gitterpunkten innerhalb des Verlagerungsweges der PVA-Maxima (obere Reihe) sowie in einer synoptisch sinnvollen Umgebung (untere Reihe) stimmt mit der in Tabelle 2 gut überein. Nach diesen Untersuchungen sollte daher auch die Frage nach verstärkten Wettererscheinungen innerhalb des Verlagerungsweges der PVA-Maxima positiv beantwortet werden.

Tabelle 6: Erklärung analog zu Tabelle 2; Anzahl der Gitterpunkte im Verlagerungsweg V der PVA-Maxima: N = 108, innerhalb der Umgebung U: N = 91

	0	>0–<1	1–<5	5–<10	10–<15
V	16	42	24	16	2
U	77	16	7		

Die Tabellen 7 und 8 geben, analog zu den Tabellen 3 und 4, Auskunft über die Güte der Modellniederschläge innerhalb der Verlagerungsgebiete der PVA-Maxima der behandelten Jet-Streak-Kategorien. Die Ergebnisse sind bei der geringen Zahl von Episoden stark von einer geprägt, bei der das EZMW-Modell große, größtenteils überschätzte Niederschlagsmengen prognostizierte. Daher ist die Verteilung der relativen Häufigkeiten nicht ganz ident mit der Testreihe aus 1986, was aber nicht als Änderung im Modell selbst interpretiert werden darf.

Tabelle 7: Vergleich der jeweils höchsten analysierten Isolinie aus Synopmeldungen und EZMW-Feldern:

Synop	5	5	5	5	10	10	20	20
EZMW	1	1	1	5	9	5	1	1

Daraus ergibt sich im Mittel eine Unterschätzung um mindestens 1 Klasse der hier verwendeten Einteilung.

Tabelle 8: analog zu Tabelle 4; Fallanzahl N = 148

RRa \ RRp	0–<1	1–<5	5–<9	9–<13
0–<1	41	14	3	
1–<5	10	13	1	
5–<9	2	6	5	
>9		4	1	

RRa-Klassen:	richtig	überschätzt	unterschätzt
alle Klassen	59	19	22
ab 1 mm/6h	44	3	53
ab 5 mm/6h	30	0	70

Somit kann eine prognostische Anwendung grob folgendermaßen formuliert werden:

- Diagnose des Satellitenbildes mit analysierten relevanten Parameterfeldern; Erfassung der satelliten-synoptischen Kategorie;
- Vergleich von analysierten und prognostizierten Feldern;
- bei Übereinstimmung oder geringfügiger Abweichung (z. B. Verlagerung des prognostizierten PVA-Maximums bis ca. 5 Grad stromaufwärts) kann eine Prognose für die nächsten 12 Stunden vorgenommen werden. Wenn im operationellen Dienst zum Zeitpunkt der Erstellung einer Prognose die Analysefelder nicht vorliegen, muß auf die Anwendbarkeit des Modelles vertraut werden, was aufgrund der hier angestellten Untersuchungen auch gerechtfertigt scheint; dies umsomehr, wenn aktuelle Satellitenbilder als Untermauerung benutzt werden;
- Prognose der Verlagerung der satelliten-synoptischen Jet-Streak-Kategorien für die nächsten 12 Stunden aufgrund der Verlagerung der relevanten Parameter;
- Kontrolle der prognostizierten EZMW-Niederschläge:
  - Verlagerungsweg der PVA-Maxima soll ein Gebiet maximaler Niederschlagsmengen sein;
  - die prognostizierten Niederschlagsmengen sind als zu gering zu betrachten: Im Mittel hat sich eine Unterschätzung um 1 bis 1,5 Klassen gezeigt. Eine Differenzierung nach der Aktivität des aktuellen Falles scheint möglich.
  - sind die aktuellen Niederschlagsmengen zum Ausgangspunkt der „sehr kurzfristigen Vorhersage“ unter 1 mm/6h, so kann den Modellniederschlägen (falls ebenfalls gering) vertraut werden; treten aber aktuell größere Niederschläge auf, so muß eine Erhöhung der prognostizierten Modellniederschläge (falls gering) vorgenommen werden.

Das nächste Kapitel stellt zusammenfassend die prognostische Anwendbarkeit in Form von Entscheidungsbäumen dar.

6.2. Erfassung von Jet-Streak-Situationen mittels operationellen Materials

6.2.1. Frontverstärkung (FV)

Ausgangsmaterial: Satellitenbild

Frontales Wolkenband vorhanden
Faser vorhanden, großer spitzer Winkel zur Front

↓

1. Schlußfolgerung:

Jet Streak nähert sich und/oder kreuzt Front
Faser in „exit region“
bei Überlagerung ist FV zu erwarten

↓

unterstützendes Material: Parameter

Frontparameter
Isotachen
Vorticitymaxima
PVA-Maxima

↓

Anwendung des konzeptionellen Modelles in Abbildung 14

↓

2. Schlußfolgerung: Vorhandensein einer FV

ja ↓

prognostische Folgerungen
für 6–12 Stunden:

1. Verlagerung der Parameter
2. Überprüfung der Niederschlagsmengen, wenn nötig Korrektur
3. Vorhersage verstärkter Wetteraktivität (Cb, ∇, ⌈↘)

nein ↓

weitere Überlegungen:

ist Modellfehler möglich?

→ ja ↓

ist PVA Max stromaufwärts
hat Faser Neigung zur Jetachse

→ ja → (zurück zu den prognostischen Folgerungen)

↓ ja ⟶ siehe 6.2.5.

→ nein ↓

weiter beobachten

6.2.2. EC oder Komma in der linken „exit region“

Ausgangsmaterial: Parameter

Isotachen
Vorticity (Krümmung, Scherung)
PVA Maximum

↓

Anwendung des konzeptionellen Modelles in Abbildung 12

↓

1. Schlußfolgerung:

in linker „exit region“ EC oder Komma

↓

unterstützendes Material: Satellitenbild

EC (Komma) vorhanden → prognostische Folgerungen für 6–12 Stunden:

1. Verlagerung der Parameter
2. Wenn Zunahme der Krümmungsvorticity Zunahme der Spiralstruktur
3. Überprüfung der Niederschlagsmengen, wenn nötig Korrektur
4. Vorhersage verstärkter Wettererscheinungen

keine Bewölkung → weiter beobachten

6.2.3. Kreuzung von Front und Jet Achse unter spitzem Winkel

Ausgangsmaterial:

Parameter:
TFP
Jet Streak

Satellitenbild:
Fasern vorhanden
frontales Wolkenband

nahe beisammen
ca. parallel

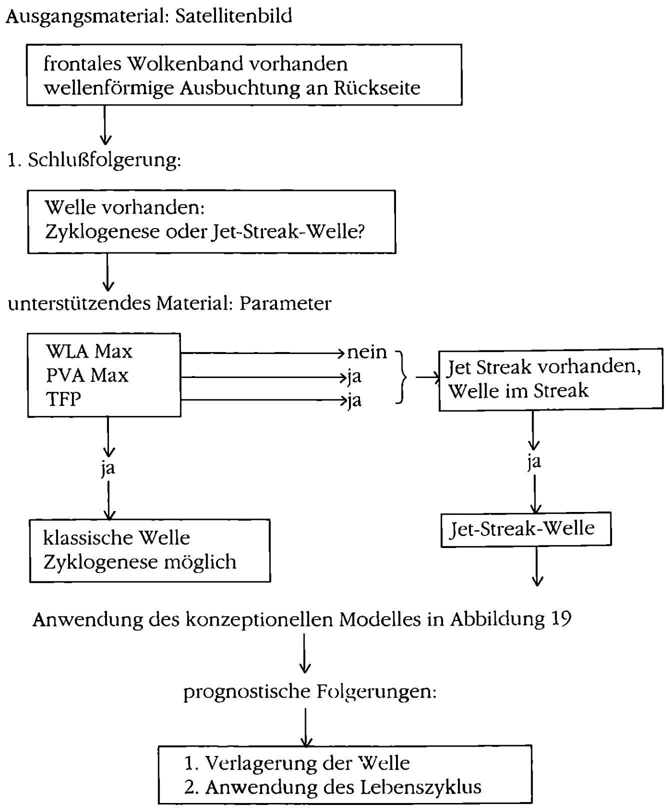
Anwendung des konzeptionellen Modelles in Abbildung 17

↓

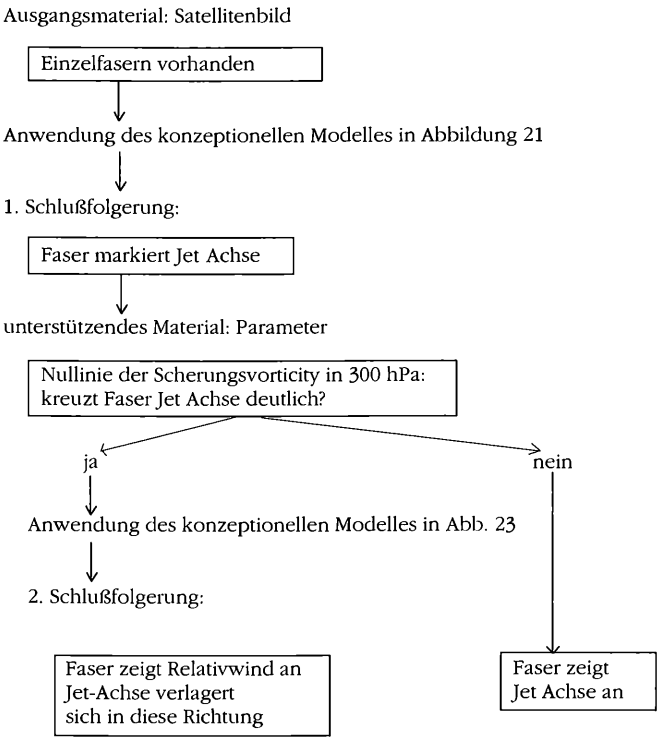
1. Schlußfolgerung:

Bewölkungsverstärkung in mittleren und hohen Schichten auf der antizyklonalen Jetseite über der Front möglich

6.2.4. Jet-Streak-Welle



6.2.5. Verlagerung der Jet Achse



6.2.6. Frontauflösung durch Absinken der trockenen Luft in der „entrance region“

Ausgangsmaterial: Satellitenbild

frontales Wolkenband vorhanden
schwarzer Streifen im WV-Bild an Wolkenbandrückseite

↓

1. Schlußfolgerung:

Auflösung der Frontbewölkung auf antizyklonaler Seite

↓

unterstützendes Material: Parameter

TFP
Jet Streak ca. parallel
trockene Luft in 300 und 500 hPa reicht über Jet Achse in antizyklonalen Teil

— nein → weiter beobachten

↓ ja

Wolkenauflösung auf antizyklonaler Seite wahrscheinlich

7. Zusammenfassende Bemerkungen

In Kapitel 1. wurden zu dem komplexen Thema der Jet-Streaks drei Problemstellungen formuliert. Nach ihrer Bearbeitung können nun folgende Aussagen zusammengefaßt werden.

Werden idealisierende Modelle, wie das Jet-Streak-Modell (UCCELLINI und JOHNSON 1979), das physikalische Vorgänge überwiegend auf isobaren Flächen betrachtet, sowie das „conveyor belt“-Modell (CARLSON 1987), das die isentropen Flächen heranzieht, modifiziert und ergänzt (siehe 4.5.) und mit Satellitenbildinformationen verknüpft, so können umfassende satelliten-synoptische Kategorien von Jet-Streak-Phänomenen abgeleitet werden. Die wichtigsten sind:

EC (Komma) in der linken „exit region“
Frontverstärkung in der linken „exit region“
antizyklonale Frontverstärkung
Jet-Streak-Welle
Faser an der Jet Achse

Sie sind in Kapitel 4. sowie in Tabelle 1 ausführlich beschrieben.

Nahezu alle Jet-Streak-Episoden sind in diese Kategorien einteilbar. und ihr Auftreten ist so häufig, daß sie synoptisch nicht nur interessant, sondern auch von hohem praktischem Wert erscheinen. Einige prognostische Möglichkeiten in diesem Zusammenhang sind:

1. Vorhersage erhöhter Wetteraktivität (Wind, Cb-Bewölkung, Schauer, Gewitter),
2. die Trennung inaktiver Wellen (Jet-Streak-Wellen) von solchen, in denen sekundäre Zyklogenese stattfinden kann und
3. Hinweise auf plötzliche und vollständige Auflösung von Frontbewölkung durch eine trockene relative Strömung („dry intrusion").

Kenntnis und Verständnis der konzeptionellen Modelle sowie der Satellitenbildphänomene erlauben es, mit einem reduzierten Satz von Modellparametern kurzfristige Vorhersagen vorzunehmen, und zwar 1.) die Vorhersage der physikalischen Situation als Ganzes (dazu benötigt man Satellitenbild, Isotachen, Vorticity und Vorticityadvektion in 300 hPa, TFP) sowie 2.) eine einfache Korrektur der im EZMW-Modell vorhergesagten Niederschlagsmengen für die Kategorien „Komma in linker exit region" und „Frontverstärkung in linker exit region"

Das Satellitenbild stellt nicht nur eine wichtige Quelle in konzeptionellen Modellen dar, sondern dient auch bei der prognostischen Anwendung im reduzierten Datensatz als „optischer first guess" für das Vorhandensein einer Jet-Streak-Kategorie ebenso wie als aktuelles Grundlagenmaterial für die laufende Überprüfung der kurzfristigen Prognose.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) im Rahmen des Projektes P6131-GEO (ZWATZ-MEISE et al. 1990) gefördert. Projektmitarbeiter waren Mag. G. MAHRINGER, J. STOCKINGER sowie J. KOVARIK. Allen sei an dieser Stelle herzlich für ihren Einsatz gedankt.

Frau Univ.-Doz. Dr. HELGA KOLB hat mir in Diskussionen wertvolle Anregungen gegeben. Die erste Fassung des Manuskriptes haben Herr Univ.-Prof. Dr. P. STEINHAUSER und Herr Univ.-Prof. Dr. M. HANTEL durchgelesen und mir mit ihren Bemerkungen wesentliche Hinweise gegeben. Allen sei mein herzlichster Dank ausgesprochen.

Ebenfalls gedankt sei Frau CH. GNAM, Frau L. PROHASKA und Herrn R. PAAR, die die Zeichnungen angefertigt haben.

Literatur

ANDERSON, R. K., ASHMANN, J. P., BITTNER, F., FARR, G. R., FERGUSON, E. W., OLIVER, V. J., and SMITH, A. H. (1969): Application of Meteorological Satellite Data in Analysis and Forecasting. ESSA Technical Report NESC 51, US Department of Commerce, ESSA, NESC.

BROWNING, K. A. (1986): Conceptual Models of Precipitation Systems. Weather and Forecasting 1, 23–41.

BROWNING, K. A., and TESTUD, J.: Mesoscale Frontal Dynamics Project. Fronts 87. Report No. 1. Meteorological Office, Bracknell.

CARLSON, T. N. (1987): Cloud configuration in relation to relative isentropic motion. EUMETSAT: Satellite and Radar Imagery Interpretation, 43–61.

EUMETSAT (1990): Workshop on the use of satellite data in Nowcasting and very short range forecasting. Proceedings EUM P 07.

FORBES, G. (1982): Toward understanding four-dimensional atmospheric processes in real time, through use of satellite imagery with other meteorological information. KNMI Memorandum 84-4, KNMI, DeBilt.

HALTINER, G. J., and MARTIN, F. L. (1957): Dynamical and Physical Meteorology. McGraw-Hill Book Company, New York, 470 pp.

HARROLD, T. W., and BROWNING, K. A. (1969): The polar low as a baroclinic disturbance. Quart J. Roy. Met. Soc. 95, 710–723.

HOINKA, K.-P., and VOLKERT, H. (1987): Das deutsche Frontexperiment 1987: Experimentplan. DFVLR-Mitt. 87-24.

HUBER-POCK, F., and KRESS, Ch. (1989): An Operational Model of Objective Frontal Analyses Based on ECMWF Products. Meteorol. Atmos. Phys. 40, 170–180.

KRESS, Ch., und ZWATZ-MEISE, V. (1980): Die Ausschöpfung des Informationsgehaltes numerischer Vorhersagekarten durch MOD und die Verknüpfung dieser Aussagen mit Satellitenbildern. Publikation Abt. f. Theoret. Meteorol. Univ. Wien Nr. 25.

KRESS, Ch., und ZWATZ-MEISE, V. (1980): Ein Beispiel der Interpretation einer Wetterlage durch Satellitenbild und Diagnoseparameter. Veröff. Zentralanstalt f. Meteorol. u. Geodyn. in Wien, Nr. 243.

KURZ, M. (1977): Synoptische Meteorologie. Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst Nr. 8. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 127S.

KURZ, M. (1986): Zur Interpretation von Satellitenbildern bei der synoptischen Analyse und Diagnose. Meteorol. Rdsch. 39, 145–151.

MAHRINGER, G., and ZWATZ-MEISE, V. (1991): A Semi-Operational Synoptic Diagnosis Method. Submitted to Physik der hohen Atmosphäre.

PALMEN, E., and NEWTON, C. W. (1969): Atmospheric Circulation Systems. Academic Press, New York, 603 pp.

PICHLER, H. (1984): Dynamik der Atmosphäre. Mannheim/Wien/Zürich: B. T., 456 pp.

RASMUSSEN, E. (1977): The polar low as a CISK phenomenon. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc 105, 531–549.

REED, R. J. (1979): Cyclogenesis in polar air streams. Mon. Wea. Rev. 107, 38–52.

REITER, E. R. (1961): Meteorologie der Strahlströme. Springer Verlag, Wien, 473 S.

RENARD, R., and CLARKE, L. C. (1965): Experiments in numerical objective frontal analysis. Mon. Weath. Rev. 93, 547–556.

UCCELLINI, L. W., and JOHNSON, D. R. (1979): The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms. Mon. Weath. Rev. 107, 682–703.

WELDON, R. B. (1979): Cloud patterns and the upper air wind field. Satellite Course Trainings Notes 4, Satellite Applications Divisions, NOAA NESDIS, Washington, D. C., 89 pp.

YOUNG, M. V., and ZWATZ-MEISE, V. (1985): Interpretation of Satellite Imagery Using Diagnostics from Numerical Forecast Models: A case study. Met 0 15 Report No. 68, Met. Office Bracknell.

ZWATZ-MEISE, V., and HAILZL, G. (1980): Interpretation of so-called Shear Bands in Satellite Images. Arch. Met. Geoph. Biokl. B28, 299–315.

ZWATZ-MEISE, V., HAILZL, G., and KRESS, Ch. (1983): Interpretation einer Wetterlage mit herkömmlichen Analysen sowie Diagnosen aus Satellitenbildern und Modellparametern. Meteorol. Rdsch., 26, 2, 58–68.

ZWATZ-MEISE, V. (1985): Der Satrep. Internes Schulungsskriptum. Zentralanstalt f. Meteorol. u. Geodyn., Wien.

ZWATZ-MEISE, V. (1987): Satellitenmeteorologie. Satelliten beobachten das Wetter. Verständliche Wissenschaft. Bd. 117, Springer-Verlag Heidelber, 169 S.

ZWATZ-MEISE, V. (1987): Synoptic Scale Diagnosis of a Cold-front Event by Satellite Images and Model Output Parameters. DFVLR Frontexperiment Mitteilungen Nr. 7, DLR Oberpfaffenhofen.

ZWATZ-MEISE, V., and KRESS, Ch. (1988a): Frontexperiment 1987: 7–8 October. Diagnosis with satellite images and derived meteorological parameters. DFVLR Frontexperiment. Mitteilung Nr. 12, DLR Oberpfaffenhofen.

ZWATZ-MEISE, V., and KRESS, Ch. (1988b): Frontexperiment 1987: 12–14 November.

Diagnosis with satellite images and derived meteorological parameters. DFVLR Frontexperiment. Mitteilung Nr. 14, DLR Oberpfaffenhofen.

ZWATZ-MEISE, V., and HUFNAGL, F. (1990): Some Results about the Relation between an objective Front Parameter and Cloud Bands in Satellite Images and its Connection to Classical Cold Front Models. Meteorol. Atmos. Phys., 42, 77–89.

ZWATZ-MEISE, V., and MAHRINGER, G. (1990): SATMOD: An Interactive System Combining Satellite Images and Model Output Parameters. Wea. and Forecasting, Vol. 5, No. 2.

ZWATZ-MEISE, V., MAHRINGER, G., STOCKINGER, J., and KOVARIK, J. (1990): Satellitenbilder für die Erfassung von Jet-Streak-Phänomenen. Projektzusammenfassung FWF P6131.